



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFRAESTRUTURA E
DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

KAREN SUELY MARTINS BERNARDO

CONCRETO AUTO ADENSÁVEL COM AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE CONCRETO

Tucuruí
2019

KAREN SUELY MARTINS BERNARDO

**CONCRETO AUTO ADENSÁVEL COM AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE
CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energ do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Infraestrutura.

Orientadora: Dr.^a Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro

Tucuruí

2019

KAREN SUELY MARTINS BERNARDO

CONCRETO AUTO ADENSÁVEL COM AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE CONCRETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energ do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Infraestrutura.

Orientadora: Dr.^a Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro.

Aprovada em 29 de Março de 2019.

BANCA EXAMINADORA:



Profa. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro (Presidente)

Profa. Dra. Isaura de Nazaré Lobato Paes

Profa. Dra. Angela Borges Masucrip

Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

B518c Bernardo, Karen Suely Martins
Concreto auto adensável com agregado miúdo reciclado
de concreto / Karen Suely Martins Bernardo. — 2019.
112 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro
Cordeiro

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético,
Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia,
Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2019.

1. Concreto autoadensável. 2. Agregado miúdo
reciclado de concreto. 3. Reologia. I. Título.

CDD 620.136

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais e maiores apoiadores, Ângela e Eden, amo vocês. E ao meu irmão, Sérgio, por todo seu carinho e ajuda.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus por ter me fortalecido ao ponto de superar as dificuldades, por toda saúde que me deu e por me permitir alcançar esta etapa tão importante da minha vida.

Agradeço imensamente à minha família, minha mãe Ângela Suely Martins Bernardo, por seu contínuo incentivo, pelas palavras de força, por sua fé em meu potencial, pelo carinho e por todas as dificuldades que só puderam ser superadas com sua presença e apoio. Ao meu pai Eden Sérgio Bernardo, quem esteve ao meu lado não apenas como meu torcedor número um, mas também como co-orientador particular e “resolvedor de problemas”, sem ele nada teria sido possível. Ao meu irmão, Eden Sérgio Bernardo Júnior, por ser meu motorista designado, por correr comigo toda vez que faltava material, sendo meu apoio em vários momentos.

Agradeço, em especial, à minha orientadora, Prof. Luciana De Nazaré Pinheiro Cordeiro, pela confiança em meu trabalho, por toda a sua paciência, por ser uma parceira durante toda a pesquisa, por ter me auxiliado e passado seus conhecimentos, aos quais foram imprescindíveis, e por ter acreditado em mim e na minha capacidade de concluir este grande desafio.

Agradeço às minhas amigas, Rosângela, Aline, Grazielle, Jaciara e Brenda, que foram minhas companheiras nesses momentos difíceis, que estiverem ao meu lado incentivando e motivando a cada passo. Aos meus colegas de mestrado, que compartilharam dessa trajetória árdua, porém edificante.

Agradeço aos meus alunos, em especial à Mikaele, Juliene e Mikael, que foram de imensa ajuda durante a realização dos ensaios. Aos funcionários do Laboratório de Engenharia Civil da UFPA, campus Tucuruí, pela cordialidade e competência durante todas as etapas ali realizadas.

RESUMO

Uma abordagem mais sustentável na produção de concreto autoadensável (CAA) visa substituir os agregados naturais por agregados reciclados, no entanto essa substituição causa uma alteração nas propriedades do material produzido. Esta pesquisa objetiva avaliar o efeito do agregado reciclado miúdo de concreto nas propriedades no estado fresco e endurecido de concretos autoadensáveis, utilizando uma metodologia de dosagem com foco na reologia dos materiais. O estudo de dosagem foi realizado através de uma adequação do método de Gomes utilizando três teores de substituição de AMN por AMRC (10%, 20% e 30%). Foram analisadas as propriedades no estado fresco de acordo com os parâmetros estabelecido na bibliografia sobre o tema e pela prescrição normativa referente, além das propriedades no estado endurecido. Neste estudo, observou-se uma redução da viscosidade aparente, da habilidade passante e da resistência à segregação proporcional ao aumento da substituição de AMN por AMRC. Porém, todos os traços alcançaram a autoadensabilidade exigida, com o mínimo de ajustes. Os traços apresentaram resistência à compressão axial que se enquadravam na classe de concreto estrutural. Portanto, por meio das respostas encontradas durante o estudo de dosagem foi possível produzir concretos autoadensáveis com teores de até 30% de AMRC que atendessem aos requisitos estabelecidos.

Palavras-chave: Concreto autoadensável. Agregado miúdo reciclado de concreto. Reologia.

ABSTRACT

A more sustainable approach in the production of self-compacting concrete (SCC) aims to replace the natural aggregates by recycled concrete aggregates, however this substitution affects the properties of the concrete produced. This research propose evaluate the effect of the fine recycled aggregate on the properties in the fresh and hardened state of self-compacting concrete using a methodology of dosage focused on the rheology of materials. The dosage study was performed through an adaptation of the Gomes method, and four levels of FNA substitution by FRCA were determined (10%, 20% and 30%). Were analyzed the fresh state properties according to the parameters established according to the specifications on the subject and by the normative prescription of reference, and the properties in the hardened state. In this study, was observed a decrease in apparent viscosity, passing ability and segregation resistance, proportional to the increase in FNA substitution. However, all mix designs have attend the required of self-compacting, with minimum adjustments. All concretes obtained axial compressive strength at which fit in the structural concrete class. Therefore, through the responses founded during the dosing study, it was possible to produce self-compacting concretes with 30% of FRCA that met the requirements established.

Keywords: Self-compacting concrete. Fine recycled concrete aggregates. Rheology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Quantidade de RCD coletado no Brasil e por região (t/dia) (ABRELPE, 2016)...	2
Figura 2. ARC envolto em argamassa na mistura de um concreto (NASSAR, 2012).....	12
Figura 3. Ensaio de espalhamento do cone de Abrams (CAVALCANTI, 2006).	26
Figura 4. Funil-V: (a) concreto; (a) argamassa (NUNES, 2001).....	28
Figura 5. Ensaio da Caixa-L (EFNARC, 2002).	30
Figura 6. Coluna de segregação (Alencar, 2008).	32
Figura 7. Resumo do método de Tutikian (2007).....	34
Figura 8. Exemplo de diagrama de dosagem com o α variando (TUTIKIAN, 2007).	36
Figura 9. Diagrama que descreve o método de dosagem (adaptado de GOMES e BARROS, 2009).....	39
Figura 10. Cone de Marsh e gráfico do ponto de Saturação (Cavalcanti, 2006).....	40
Figura 11. Cone de Kantro (Cavalcanti, 2006).....	41
Figura 12. Redução do Espalhamento e do tempo de fluxo (SAFIUDDIN et al., 2011)	46
Figura 13. Densidade e porosidade de CAA aos 90 dias (ABED et al.,2018).	47
Figura 14. Resistência à compressão aos 1, 4, 7, 28 e 90 dias, em cubos (KOU e POON, 2009).....	48
Figura 15. Fluxograma da metodologia.....	50
Figura 16. Distribuição do tamanho de partículas da amostra de sílica ativa.	53
Figura 17. Composição granulométrica do agregado graúdo.....	55
Figura 18. Composição granulométrica da areia natural.....	58
Figura 19. Curva granulométrica do AMRC.....	60
Figura 20. Aparato de Acrílico.....	61
Figura 21. Tanque para imersão.....	61
Figura 22. Aparato preso à balança durante ensaio.....	61
Figura 23. Esquema para disposição dos materiais (LEITE et al. 2011).	61
Figura 24. Curva de absorção do AMRC.....	63
Figura 25. Cone sob a placa de vidro.....	65
Figura 26. Enchimento do cone.....	65
Figura 27. Cone preenchido para ensaio.....	65
Figura 28. Tronco de cone para espalhamento em argamassas (EFNARC, 2002).	67
Figura 29. Procedimento de mistura adotado por Lisbôa (2004).	71
Figura 30. Procedimento de mistura adotado por Singh et al. (2018).....	71
Figura 31. CAA com volume de pasta de 38%.	74
Figura 32. Espalhamento do CAA com volume de pasta de 38%.....	74
Figura 33. CAA com volume de pasta de 40%.....	75
Figura 34. Espalhamento do CAA com volume de pasta de = 40%.	75
Figura 35. Pasta piloto a/c 0,47.....	79
Figura 36. Pasta piloto a/c 0,49.	79
Figura 37. Pasta piloto a/c 0,47.	80
Figura 38. Pasta piloto a/c 0,49.	80
Figura 39. Tempo de fluxo (Log.) versus a variação de sp/c.....	81
Figura 40. Pasta com sp/c 0,6%.....	81
Figura 41. Pasta com sp/c 0,8%.....	81
Figura 42. Pasta com sp/c 1,0%.....	81
Figura 43. Fluxograma para estudo da pasta.	82

Figura 44. Tempo de fluxo (Log.) versus a variação de sp/c.	83
Figura 45. Argamassa com sp/c 0,6%.	84
Figura 46. Argamassa com sp/c 0,8%.	84
Figura 47. Argamassa com sp/c 1,0%.	84
Figura 48. Argamassa com areia natural.	85
Figura 49. Argamassa com 10% de AMRC.	85
Figura 50. Argamassa com 20% de AMRC.	85
Figura 51. Argamassa com 30% de AMRC*.	85
Figura 52. Fluxograma do estudo da argamassa.....	86
Figura 53. Espalhamento do CAA com 0% AMRC.....	89
Figura 54. Espalhamento do CAA com 10% AMRC.....	89
Figura 55. Espalhamento do CAA com 20% AMRC.....	90
Figura 56. Espalhamento do CAA com 30% AMRC.....	90
Figura 57. Resultado da análise da variância (ANOVA) pelo teste de Turkey.....	95
Figura 58. Fluxograma completo para produção do CAA.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Massa Específica (kg/m^3) e Absorção (%) de Agregados miúdos Reciclados de concreto.	10
Tabela 2. Normas para uso de agregados reciclados de concreto	11
Tabela 3. Propriedades físicas, químicas e mineralógicas do AMRC.....	14
Tabela 4. Efeitos de diferentes materiais na reologia das argamassas (BANFILL,1994)...	23
Tabela 5. Valores de espalhamento e tempo (T50) recomendados por diversos autores (Adaptado de Tutikian, 2004).....	27
Tabela 6. Limites de resultados e dimensões para o v-funnel test, segundo diversas referências (Tutikian, 2004).	29
Tabela 7. Limites de resultados e dimensões para o ensaio da caixa em L, segundo diversas referências (Tutikian, 2004).	31
Tabela 8. Faixa de valores para proporções de misturas de CAA (Adaptado de Lisbôa, 2004).....	42
Tabela 9. Faixa dos parâmetros de autoadensibilidade.	43
Tabela 10. Características físico-químicas do CP II – E	51
Tabela 11. Composição química do CP II – E	52
Tabela 12. Composição química da sílica ativa.	53
Tabela 13. Propriedades do Superplastificante utilizado.....	54
Tabela 14. Composição granulométrica do Agregado Graúdo.	55
Tabela 15. Composição granulométrica da areia natural	57
Tabela 16. Composição granulométrica do AMRC.	59
Tabela 17. Resultado do ensaio de absorção.	62
Tabela 18. Quantitativo de materiais com a relação a/c como fator variável.....	66
Tabela 19. Parâmetros de espalhamento.....	68
Tabela 20. Quantitativo de materiais variando a relação sp/c.	68
Tabela 21. Quantitativo de materiais com a relação sp/c como fator variável.....	69
Tabela 22. Série de equações utilizadas para o cálculo do CAA	73
Tabela 23. Quantitativo de materiais para dosagem de 1m^3 de CAA.	74
Tabela 24. Quantitativo de materiais para dosagem de 1m^3 de CAA (com e sem AMRC).75	
Tabela 25. Método de ensaio para determinação das propriedades mecânicas.	76
Tabela 26. Espalhamento médio com variação da relação a/c.	78
Tabela 27. Espalhamento médio com variação da relação sf/c.	79
Tabela 28. Espalhamento médio e tempo de fluxo com variação da relação sp/c.	80
Tabela 29. Espalhamento médio e tempo de fluxo com variação da relação sp/c em argamassas.	83
Tabela 30. Quantitativo de materiais com a relação sp/c como fator variável.....	84
Tabela 31. Ensaio para determinação do teor de vazios.....	87
Tabela 32. Resultados do ensaio da Caixa L.	88
Tabela 33. Resultados do ensaio de espalhamento.....	89
Tabela 34. Resultado do ensaio de teor de ar incorporado.....	90
Tabela 35. Resultado do ensaio do Funil-V.	91
Tabela 36. Resultado do ensaio da coluna de segregação.	91
Tabela 37. Resultado da resistência à compressão dos traços.	92
Tabela 38. Resultados da resistência à tração.....	93
Tabela 39. Resultado do módulo de elasticidade.	93
Tabela 40. Resultados da análise de variância	94
Tabela 41. Resultados do teste de Tukey	95

Tabela 42. Ensaio de autoadensabilidade dos traços pesquisados.....	97
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a/c	Relação água/cimento
A_{bs}	Absorção (%)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AGRC	Agregado graúdo reciclado de concreto
AN	Areia Natural
AMRC	Agregado miúdo reciclado de concreto
AR	Agregado reciclado
ARC	Agregado reciclado de concreto
ar/br	Relação areia/brita
C.C.	Concreto convencional
C₃A	Aluminato tricálcico
CAA	Concreto auto-adensável
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
cm	Centímetro
CP	Cimento Portland
CP II	Cimento Portland Composto
d	Diâmetro medido após o espalhamento da argamassa
E_c	Módulo de deformação estático
f/c	Relação do filer em relação à massa de cimento
f_c	Resistência à compressão
f_{c28}	Resistência à compressão aos 28 dias
f_t	Resistência à tração
g	Gramas
GPa	Gigapascal
h	Altura

H₂/H₁	Relação final entre as alturas do concreto no final do trecho horizontal e a altura do concreto remanescente do trecho vertical da caixa
Kg	Quilograma
l	Litros
log T	Logaritmo do tempo
m	Metro
m	Massa da amostra
M.U.	Massa unitária
m³	Metro cúbico
ml	Mililitro
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
M_s	Massa seca
M_{sat}	Massa saturada
NBR	Norma Brasileira
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
R²	Coefficiente de correlação
RCC	Resíduo da Construção Civil
RCD	Resíduo da Construção e Demolição
s	Segundo
SP	Superplastificante
sp/c	Relação do superplastificante em relação à massa de c
T	Tempo
T₁₁₅	Tempo para a pasta atingir um diâmetro de 11,5 cm
T₅₀	Tempo para o concreto alcançar um diâmetro de 50 cm
TL₂₀	Tempo de fluxo para o concreto alcançar um comprimento horizontal de 20 cm
TL₄₀	Tempo de fluxo para o concreto alcançar um comprimento horizontal de 40 cm
t_s	Teor de sólidos do aditivo
V	Volume
V_a	Volume de agregado miúdo
V_{ar}	Volume de ar incorporado ao concreto
V_g	Volume de agregado graúdo
μ	Massa específica

SUMÁRIO

1. CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	3
1.2. QUESTÃO DE PESQUISA	5
1.3. OBJETIVO DA PESQUISA	5
1.3.1. Objetivo Principal	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
1.4. HIPÓTESES	6
1.5. DELIMITAÇÕES	6
1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1. AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO	8
2.1.1. Definições	9
2.1.2. Características do ARC	10
2.2. CONCRETO AUTOADENSÁVEL	14
2.2.1. Principais Características e Propriedades	15
2.2.2. Materiais Constituintes	17
2.2.2.1. Cimento	17
2.2.2.2. Adições minerais	18
2.2.2.3. Agregados	19
2.2.2.4. Aditivos Químicos	20
2.2.2.5. Água	21
2.2.3. Aspectos Reológicos	22
2.2.4. Vantagens e aplicação	24
2.3. AVALIAÇÃO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL	25
2.3.1. Ensaio de Espalhamento (Slump Flow Test e Slump Flow T50)	26
2.3.2. Ensaio do Funil-V (V funnel test)	28
2.3.3. Ensaio da Caixa-L (L-Box test)	30
2.3.4. Ensaio da Coluna de Segregação (Column Segregation test)	32

2.4.	MÉTODOS DE DOSAGEM	33
2.5.	PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM ARC	43
2.5.1.	Propriedades no estado fresco	44
2.5.2.	Propriedades de estado endurecido	47
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	49
3.1.	ASPECTOS GERAIS	49
3.2.	FASE 1: SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	51
3.2.1.	Cimento	51
3.2.2.	Adição Mineral – Sílica ativa	52
3.2.3.	Aditivo Superplastificante	54
3.2.4.	Agregado Graúdo	54
3.2.5.	Agregado Miúdo Natural	56
3.2.6.	Agregado Miúdo Reciclado de Concreto	58
3.2.7.	Água	63
3.3.	FASE 2: ESTUDO DA PASTA	64
3.4.	FASE 3: ESTUDO DA ARGAMASSA	66
3.5.	FASE 4: DETERMINAÇÃO DO ESQUELETO GRANULAR	69
3.6.	FASE 5: DOSAGEM E PRODUÇÃO DO CAA	70
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
4.1.	FASE 2: ESTUDO DA PASTA	78
4.1.1.	Considerações sobre a fase 2	81
4.2.	FASE 3: ESTUDO DA ARGAMASSA	83
4.2.1.	Considerações sobre a fase 3	85
4.3.	FASE 4: DETERMINAÇÃO DO ESQUELETO GRANULAR	87
4.3.1.	Considerações sobre a fase 4	87
4.4.	FASE 5: DOSAGEM E PRODUÇÃO DO CAA	88
4.4.1.	Propriedades no estado fresco	88
4.4.2.	Propriedades no estado endurecido	92
4.4.2.1.	Análise de variância	94
4.4.3.	Considerações sobre a fase 5	96
5.	CONCLUSÕES	100

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Com a aceleração do crescimento econômico, os países desenvolvidos estão investindo parcelas cada vez maiores de seus orçamentos na construção de grandes obras de infraestrutura. Segundo Tessaro, Sá e Scremin (2012), a atividade da construção civil favorece o desenvolvimento econômico, em contrapartida, ocorrem diversas alterações ambientais em virtude da necessidade de extração da matéria prima.

Silva et al. (2018), consideram que uma das melhores abordagens para garantir a sustentabilidade nas etapas de construção, demolição e reforma, seja diminuir os impactos associados à extração de materiais utilizados. A adoção de estratégias específicas a fim de reduzir o uso de matérias-primas e impedir a produção de resíduos seria, segundo os autores, a solução mais completa. No entanto, entende-se que o uso de tais estratégias caracterizaria uma mudança em longo prazo, deste modo a reciclagem dos resíduos demonstra ser uma solução alternativa de curto prazo.

Assim como a produção de resíduos, a falta de gerenciamento desses materiais afeta as cidades nos aspectos sociais, econômicos e ambientais. Desta forma, ações no sentido de enfrentar este problema tiveram início no final da década de 1980 em alguns países da Europa, enquanto que no Brasil somente no início do século XXI essa problemática começou a ser enfrentada (BRASILEIRO e MATOS, 2015). No Brasil, foi estabelecida em 2002 a Resolução nº 307 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), a qual institui diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, buscando assegurar benefícios de ordem social, econômica e ambiental.

Outro avanço observado no ano de 2010, ocorreu com a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), por intermédio da Lei nº 12.305, a qual define a forma como o país deve dispor os seus resíduos, incentivando a reciclagem e a sustentabilidade.

Contudo, a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON) estimou que a taxa de reciclagem de RCD seja de apenas 21% do resíduo gerado. Esse valor representa, em média, 45% da capacidade de produção das usinas de reciclagem implantadas em todo o país (ABRECON, 2016).

A Figura 1 mostra que os municípios coletaram cerca de 45,1 milhões de toneladas de RCD em 2016, o que conFigura uma diminuição de 0,08% em relação a 2015

(ABRELPE, 2016). Ainda que pareça favorável, esta situação exige atenção especial visto que a quantidade total desses resíduos é maior, uma vez que os municípios contabilizam apenas os materiais lançados nos logradouros públicos.

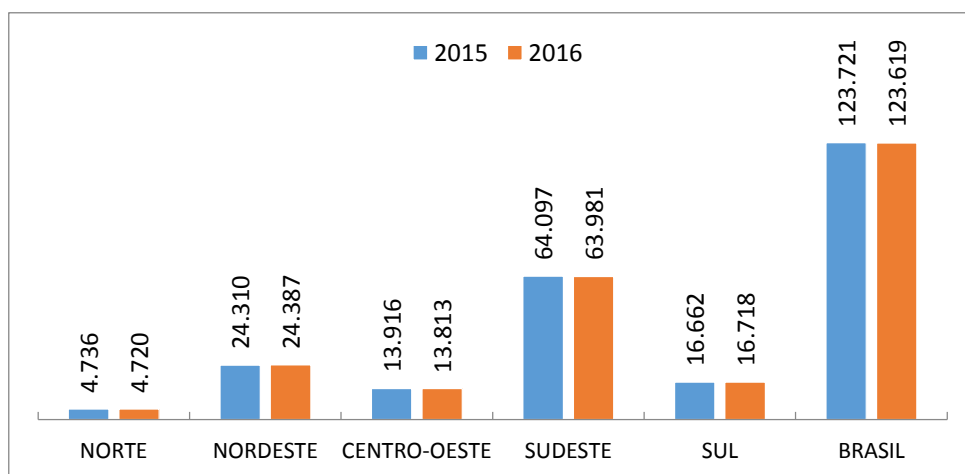


Figura 1. Quantidade de RCD coletado no Brasil e por região (t/dia) (ABRELPE, 2016).

Dentro da reciclagem dos resíduos produzidos pela indústria da construção civil, os resíduos de concreto merecem destaque por possuírem um grande potencial de reutilização, devido principalmente ao conhecimento de suas características básicas (f_{ck} , composição, entre outros) e por conta do seu menor grau de contaminação por outros materiais, comparando-o aos resíduos mistos (BUTTLER, 2003).

A forma mais utilizada do resíduo de concreto é na forma de agregado, tanto sua fração graúda quanto miúda. Estes materiais podem ser inseridos na produção de novas misturas para diversos fins, como em pavimentação, argamassas de revestimento, concreto convencional, entre outros (CAVALHEIRO, 2011).

A produção de concreto convencional (CC) com o uso de agregado reciclado de concreto (ARC) em substituição ao agregado natural (AN) tem sido investigado por alguns autores, como Evangelista et al., (2007), que estudaram o comportamento mecânico de um concreto estrutural com substituição parcial de areia natural por agregados miúdos reciclados de concreto (AMRC), conseguindo substituições de até 30% sem comprometer as propriedades mecânicas do mesmo.

Podem ser citados também, Abreu et al. (2018), que analisaram o desempenho mecânico de concretos utilizando agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) de múltiplas reciclagens, conseguindo a incorporação desse material de várias gerações para as mais diversas aplicações.

Além do emprego dos agregados reciclados de concreto em concretos convencionais, existem pesquisas atestando o uso desse material em concreto

autoadensável (CAA) (KOU E POON, 2009; GRDIC et al., 2010; SAFIUDDIN et al., 2012; NEPOMUCENO, 2014; CARRO-LÓPEZ, 2015, entre outros). No entanto, o concreto autoadensável exige maiores cuidados durante a sua produção quando comparado ao concreto convencional, principalmente por ser muito sensível às variações das características dos materiais que o constituem e aos procedimentos de produção (De LARRARD, 1999).

Grdic et al. (2010), estudaram as propriedades de concretos autoadensáveis (CAA) produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto. O agregado natural foi substituído em proporções de 50% e 100% por AGRC, sem qualquer saturação prévia. O experimento concluiu que o uso de ARC no CAA é justificado, e desde que a qualidade do ARC seja comprovada, concretos de alto desempenho podem ser alcançados.

Apesar do crescente interesse acadêmico, segundo os autores Khoshkenari et al. (2014), para investigar o potencial uso de agregados reciclados de concreto na produção de concretos de alta resistência, alto desempenho, leves e autoadensáveis, é recomendado que mais pesquisas sejam executadas, principalmente sobre a influência do uso de agregados reciclados nos principais parâmetros que regem o comportamento reológico do material.

Portanto, esse estudo busca aprimorar os conhecimentos quanto à influência dos agregados miúdos reciclados de concreto em concretos autoadensáveis, utilizando uma abordagem com foco na reologia dos materiais.

1.1. Motivação e Justificativa da Pesquisa

Devido à sua proporção, a indústria da construção civil emprega grande quantidade de trabalhadores, sendo responsável por grande parcela da formação bruta de capital, movimentando ativamente a economia (CBIC, 2017). As atividades de extração de matéria-prima, produção de materiais, construção e demolição, consomem cerca de 75% dos recursos naturais, o que causa efeitos impactantes no meio ambiente (JONH, 2000).

No Brasil, o volume de resíduos da construção civil (RCC) gerado anualmente é elevado e tem a tendência de aumentar caso não sejam tomadas precauções para impedir seu avanço. O desenvolvimento de novas técnicas, principalmente relativas ao aproveitamento de materiais, ajuda a minimizar essa situação, assim como a racionalização nos projetos e qualificação de funcionários (SIMONI et al, 2015).

Diversos pesquisadores propuseram abordagens diferentes para reduzir o uso de recursos naturais, podendo ser citados: as cinzas volantes (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2011), resíduos de diferentes processos, como cerâmicas (AWOYERA et al., 2016), resíduos de óleo de palma (UL ISLAM et al., 2016), resíduos de borracha de pneus (THOMAS et al., 2016) e agregados de argila e agregados reciclados (MUÑOZ-RUIPEREZ et al., 2016).

A utilização dos resíduos de concreto como agregado para novas dosagens pode implicar em uma redução dos custos envolvidos com a exploração e transporte dos agregados naturais e, além disso, reduzir o volume de resíduos despejados no meio-ambiente (BUTTLER, 2003).

Por conta do conhecimento de suas origens, os resíduos provenientes de concretos demonstram uma grande potencialidade a serem reutilizados como matéria prima alternativa aos agregados naturais. No entanto, uma vez que a tendência do mercado competitivo da construção civil estabelece como prioridade a relação desempenho-qualidade-custo, o estudo do concreto autoadensável (CAA) com agregados reciclados tem que contribuir para uma aproximação efetiva entre as áreas técnicas e econômicas, considerando as necessidades tanto do setor de construção quanto de seus clientes finais.

Os agregados graúdos reciclados de concreto foram foco de pesquisas em vários países, e de diversos autores (ZEGA, 2010; GRDIC, 2010; PEREIRA-DE-OLIVEIRA, 2014, entre outros). No entanto, a fração miúda desses agregados reciclados ainda carece de maiores pesquisas que demonstrem a sua influência na reologia do CAA.

Conforme Evangelista et al. (2015), os agregados miúdos reciclados são excluídos da produção de concretos e argamassas em quase todas as normas e regulamentos existentes. A introdução desse material na produção de concreto representaria uma oportunidade para a indústria da construção, porém é necessário a plena compreensão das propriedades dos agregados e de seus efeitos em um novo concretos.

O concreto autoadensável, segundo NBR 15283 (2017) é aquele capaz de fluir, autoadensar pelo seu peso próprio, preencher as fôrmas e passar por armaduras, dutos e insertes, enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação). Para atingir essas características, a dosagem necessita de uma quantidade maior de finos que reduzam o atrito interno.

A possibilidade de usar o AMRC em concreto autoadensável foi demonstrada em pesquisas realizadas por Kou e Poon (2009), Carro-Lopez et al. (2015), no entanto, o efeito

desse tipo de agregado reciclado com uma absorção tão elevada, não foi observado nas propriedades do estado fresco do CAA.

Baseado neste pressuposto, o presente trabalho busca desenvolver um concreto autoadensável utilizando agregados miúdos reciclados de concreto em substituição parcial aos agregados naturais, mediante uma metodologia de dosagem focada na reologia do material.

A escolha do tema que rege esta pesquisa fundamenta-se na carência de pesquisas focadas no estudo de dosagem de concretos autoadensáveis produzidos com AMRC, que levem em consideração a influência desse material em um estudo de reologia. Esse contexto motivou a busca de uma metodologia que empregue esse material de forma eficiente, reduzindo a perda de propriedades reológicas do CAA.

1.2. Questão de Pesquisa

Esta pesquisa buscar responder de forma satisfatória a seguinte questão:

“A utilização de uma metodologia focada na reologia do concreto autoadensável minimiza a influência da substituição parcial de agregados naturais por AMRC, nas propriedades do estado fresco?”

1.3. Objetivo da Pesquisa

1.3.1. Objetivo Principal

Este trabalho tem como objetivo geral realizar uma adequação da metodologia de dosagem para concreto autoadensável com substituição parcial do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado de concreto (AMRC), avaliando suas propriedades no estado fresco e endurecidos.

1.3.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos que motivam a realização deste trabalho são:

- averiguar a influência do estudo da fase da argamassa nas propriedades do concreto autoadensável produzido.
- avaliar o efeito da substituição do agregado miúdo natural por AMRC na autoadensabilidade do CAA.
- avaliar o efeito do teor de substituição de agregado miúdo natural por AMRC nas propriedades mecânicas do CAA.
- analisar a eficiência do método de dosagem utilizado na produção de concretos autoadensáveis com substituição parcial de agregado miúdo natural (AMN) por AMRC.

1.4. Hipóteses

A hipótese adotada para este estudo considera que, apesar da substituição de um agregado miúdo natural por um proveniente de resíduos de concreto afetar o desempenho no estado fresco e endurecido de concretos autoadensáveis, esse efeito deve ser minimizado ao utilizar uma metodologia de dosagem que foca no estudo da reologia dos materiais constituintes.

1.5. Delimitações

Esta pesquisa delimita-se à utilização de agregados miúdos reciclados de concreto, após processo de beneficiamento em britador de mandíbula, provenientes do Laboratório de Engenharia civil, campus Belém. Restringe-se também a uma análise das propriedades de autoadensabilidade e mecânicas de concretos autoadensáveis produzidos com estes materiais.

1.6. Estrutura da dissertação

A presente dissertação foi dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo é apresentada a introdução, com a justificativa da escolha do tema, os objetivos (geral e específico), a formulação da questão de pesquisa, e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo é dedicado à revisão bibliográfica, o qual apresenta dados sobre os resíduos de concreto, suas definições e características, apresenta o concreto

autoadensável, suas propriedades no estado fresco, as características dos materiais constituintes, e a descrição do método de dosagem.

O terceiro capítulo apresenta o programa experimental, descrevendo a metodologia adotada na caracterização dos materiais e seus resultados, a metodologia utilizada para a composição e produção das misturas de pasta, argamassa e CAA, contendo AN e com substituição parcial por AMRC.

No quarto capítulo são apresentados os resultados e as discussões da pesquisa, desde o estudo da pasta, argamassa e do esqueleto granular. Apresenta-se também o estudo das propriedades no estado fresco e endurecido do CAA.

No quinto e no sexto capítulo estão as conclusões da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros, que podem elucidar outras questões levantadas durante a pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa bibliográfica foi realizada objetivando um panorama com o maior número possível de informações sobre o tema, principalmente quanto às propriedades dos agregados reciclados de concreto, sendo apresentados alguns tópicos referentes à influência deste material em concretos autoadensáveis. Por fim, é apresentado o método de dosagem e suas particularidades.

2.1. Agregado reciclado de concreto

Conforme Mizumoto et al. (2007), a escassez de recursos naturais extraídos no planeta e a redução das áreas úteis em centros urbanos são as principais responsáveis pelo desenvolvimento de estudos sobre reaproveitamento de resíduos na construção civil.

Considera-se resíduo de construção e demolição (RCD) todo e qualquer resíduo proveniente de atividades de construção, sejam estas novas edificações, reformas, demolições, que envolvam atividades de obras de arte e limpeza de terrenos com presença de solo ou vegetação (CAMPOS, 2017).

De acordo com Cabral (2013), a composição dos RCD é variável e depende da localização geográfica, da época do ano, do estágio da construção ou reforma, do tipo de estrutura e da técnica de demolição empregada, entre outros fatores. O mesmo autor ainda estima que, no Brasil, a composição média dos RCD seja 65% de origem mineral (rochas, concretos, materiais cerâmicos e argamassas, por exemplo), 13% de madeira, 8% plástico e que 14% correspondam a outros resíduos.

Os diferentes materiais presentes no RCD são responsáveis pela heterogeneidade do agregado reciclado resultante, característica esta que dificulta sua reciclagem e consequente aplicação do agregado reciclado de RCD para a produção de um novo concreto (ÂNGULO, 2005).

Dentre os materiais considerados resíduos de construção e demolição, destaca-se o resíduo de concreto, sendo considerado o resíduo que apresenta maior potencial de reciclagem.

O estudo da técnica de utilização de agregados reciclados, não se resume apenas às propriedades do material, mas também a pesquisas relacionadas ao processo de britagem

e produção de resíduos, visando acrescentar um valor econômico à este material que apresenta grande potencial de mercado.

2.1.1. Definições

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCD), são resíduos sólidos urbanos que, quando não separados dentre suas diversas composições, poderiam ser classificados, de acordo com a NBR 10004 (2004), como Classe II A - Não-Inertes, apesar de, em sua composição, predominarem resíduos inertes, como concretos, argamassas, cerâmicas, vidros, blocos, solos e rochas (MERINO et al., 2010).

Conforme Taveira (2010), o RCD é todo e qualquer resíduo proveniente das atividades de construção, sejam eles de novas construções, reformas, demolições, obras de arte e limpeza de terrenos com presença de solos ou vegetação. Em contrapartida, Buttler (2003) indica que os resíduos de concreto incluem preponderantemente rejeitos oriundos da demolição de estruturas de concreto, resíduos de usinas de concreto pré-misturado, fábrica de elementos pré-moldados e pavimentos de concreto.

O ARC deve compreender um mínimo de 90%, em massa, de fragmentos à base de cimento Portland e agregado natural, segundo a NBR 15116 (2004), sendo obtido principalmente por processo de britagem e peneiramento. Nas fábricas de pré-moldados, o concreto desperdiçado é oriundo de elementos rejeitados pelo controle de qualidade final de linhas de produção e sobras de concreto ao final do processo.

As usinas de concreto podem ser vistas como outra importante fonte geradora, tendo em vista que o concreto desperdiçado nessas centrais pode ser oriundo de diversas fontes, seja pelo retorno de sobras de concreto nos caminhões betoneira, bombas de concreto ou pela lavagem dos caminhões e instalações da central dosadora.

Guerreiro (2008) indica que o desperdício de concreto dosado em central ocorre principalmente na tubulação e no agitador das bombas de concreto, bem como na limpeza nas instalações da Central.

Segundo Thomas et al. (2018), os agregados de concreto reciclados podem ser produzidos por britagem primária, ou pela incorporação de uma britagem secundária, de resíduos de concreto. Do ponto de vista econômico, um único processo de britagem é geralmente preferido.

As propriedades do ARC dependem, em grande parte, das características do concreto original, a partir do qual os agregados reciclados são obtidos. Portanto, torna-se interessante a exploração das características comumente observadas nos agregados reciclados de concreto.

2.1.2. Características do ARC

As propriedades do agregado reciclado de concreto e os efeitos de sua incorporação no concreto receberam a atenção de vários pesquisadores, pois o material, apesar das óbvias vantagens ambientais, apresenta propriedades distintas ao ser comparado aos agregados naturais, o que têm impedido seu uso regular (SILVA et al., 2014).

A principal diferença entre os ARC e os agregados naturais (AN), em termos físicos, é a argamassa que fica aderida à sua superfície, que é uma das principais razões para perdas de qualidade (TAM et al., 2005; JUAN et al., 2009; SILVA, 2014; POON et al., 2004). A presença dessa camada de argamassa é responsável por reduzir a densidade e aumentar significativamente a absorção de água dos agregados reciclados de concreto.

Santos (2016) afirma que concretos produzidos com agregados reciclados de concreto (ARC), de maneira geral, costumam apresentar melhores características quando comparados a outros tipos de agregados reciclados, proporcionando resultados de resistência à compressão competitivos, aos apresentados por concretos convencionais.

Baseada na revisão bibliográfica a respeito das características dos agregados miúdos provenientes da reciclagem de concreto, na Tabela 1 encontram-se dispostos alguns valores de massa específica e absorção.

Tabela 1. Massa Específica (kg/m³) e Absorção (%) de Agregados miúdos Reciclados de concreto.

AUTOR, ANO	Massa Específica (g/cm ³)	Absorção (%)
CABRAL et. al., 2007	2,56	7,6
TAVEIRA, 2010	2,60	2,1
ZEGA, 2011	2,56	8,5
CARRO-LÓPEZ, 2015	2,60	9,3
BOGAS et al., 2016	2,16	9,1
FAN et al., 2016	2,40	6,6
PEDRO, 2017	2,40	3,9
OMRANE, 2017	2,41	9,0

Os resultados apresentam uma grande variabilidade, o qual pode ser relacionado com as propriedades específicas de cada material-base e dos métodos de ensaio adotados. Além disso, essas diferenças podem decorrer da granulometria, afetada pelo tipo de britador utilizado, das diferentes porosidades e resistências mecânicas do concreto-base.

Segundo Cavalheiro (2011) pode-se dizer que o método de ensaio empregado causa grande influência nestes valores, uma vez que as normas utilizadas para estes ensaios objetivam seu uso em materiais naturais, e podem não avaliar adequadamente o ARC.

Também de acordo com Quattrone et al. (2016), essa abordagem não atende às necessidades dos procedimentos de controle de qualidade, necessários para produzir agregados reciclados para diferentes aplicações. Ainda segundo os autores, os procedimentos padronizados têm vários pontos críticos e podem não ser inteiramente apropriados para investigar as propriedades dos agregados reciclados.

Em países como Alemanha, Japão, Holanda, Dinamarca, Bélgica, França e Estados Unidos, a utilização de agregados reciclados já é uma realidade que tem levado a busca do desenvolvimento de novas técnicas de ensaios e de normalizações que garantam a qualidade destes materiais (SINGH, 2007).

A Tabela 2 apresenta um comparativo entre as principais exigências da Norma Brasileira e algumas das principais normas internacionais, para o uso dos agregados reciclados de concreto.

Tabela 2. Normas para uso de agregados reciclados de concreto

País/Norma	Massa específica mínima (kg/m³)	Máxima absorção de água (%)	Máximo teor de cloretos (%)	Máximo teor de sulfatos (%)
Brasil ABNT NBR 15116/2004	-	7	1,0	1,0
Alemanha DIN 4226-100/2002	2000	10 a 15	0,04	0,8
China WBTC 12:2002	2000	10	0,05	1,0
RILEM/1997	2000	10	-	1,0
Reino Unido BS 8500-2/2002	-	-	-	1,0
Holanda CUR/1994	2000	-	0,05	1,0
Portugal E 471/2006	2000	7	-	0,8
Suíça SIA 162/4/1994	-	-	0,03	1,0
Dinamarca DCA/1990	2000	-	-	-

Fonte: adaptado de GONÇALVES (2007)

Através da análise das informações visualizadas na Tabela 2, observa-se que as propriedades normalmente avaliadas pelas Normas são a massa específica e a absorção de água, sendo que a massa específica mínima para ARC gira em torno de 2,0 g/cm³, seguido com maior ou menor rigor, por praticamente todas as normas, de teores de absorção de água entre 7 e 15%, e tendo o teor de sulfatos e cloretos limitado em quase todos os países.

Para compensar a diferença na absorção observada entre agregados reciclados e agregados naturais, Leite et al. (2011) propôs um método alternativo para a avaliação da absorção de AR, tanto miúdos quanto graúdos. Pelo método proposto, é realizado o monitoramento do ganho de massa do material em estado submerso ao longo de 24 horas. Dessa forma, pode-se optar pela compensação de uma taxa buscando evitar a perda de trabalhabilidade de concretos no estado fresco.

Na literatura alguns métodos são utilizados de maneira a reduzir essa perda de trabalhabilidade e propriedades mecânicas: a saturação, a pré-saturação ou a compensação de água da taxa de absorção. Segundo Hansen (1992) citado por Leite e Monteiro (2016), existem vários estudos sobre os métodos de pré-saturação para reduzir a água de mistura absorvida pelo AR. Entretanto, segundo os autores, estudos subsequentes apontaram que a absorção de água de um AR dentro de uma mistura de concreto pode ser diferente da absorção de água livre da partícula de AR.

Alguns autores que realizaram a pré-saturação um dia antes da mistura (Poon et al., 2004; Etxeberria et al., 2006; Etxeberria et al., 2007), ou entre 5 a 8 min dentro dos misturadores (Ferreira et al., 2011; Leite et al., 2013) relataram algumas melhorias na nova Zona de Transição do concreto reciclado, mas os resultados ainda são considerados controversos. A Figura 2 mostra um esquema de um grão de ARC cercado pela argamassa nova em um concreto.

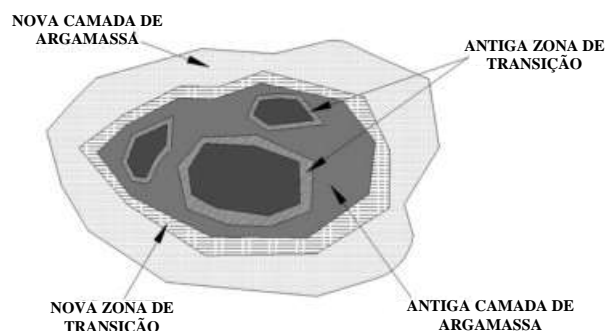


Figura 2. ARC envolto em argamassa na mistura de um concreto (NASSAR, 2012).

Os autores Etxeberria et al. (2007) e Leite et al. (2013) sugerem o uso de 50% de taxa compensação ou valores maiores de compensação parcial da água, a fim de se obter um melhor comportamento em propriedades no estado fresco ou mecânicas.

Ferreira et al. (2011) estudaram a influência da pré-saturação do agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC), comparando ao método de compensação da água na mistura. Os autores concluíram que a pré-saturação do AGRC foi levemente prejudicial ao desempenho mecânico do concreto e, principalmente, ao desempenho de durabilidade, em comparação com o método de compensação da água de mistura.

Em relação à densidade do concreto reciclado, Silva et al. (2018) realizaram uma revisão sobre a influência de ARC no concreto no estado fresco e apontaram um consenso onde à medida que o teor de agregado reciclado aumenta, a densidade do concreto diminui, sendo que sua magnitude depende da densidade e porosidade do AR, substituindo o agregado natural.

Sobre as propriedades mecânicas, Evangelista e de Brito (2007), usaram AMRC, derivados de concretos moldados em condições laboratoriais. Este estudo indicou que o AMRC produzido em laboratório poderia ser usado em até 30% de taxa de substituição sem ter um efeito significativo nas propriedades mecânicas (resistência à compressão, tração à ruptura, módulo de elasticidade e resistência à abrasão) do concreto estudado.

Em relação às propriedades físicas, químicas e mineralógicas, Evangelista et al. (2015) compararam a fração miúda do agregado reciclado produzido a partir de concreto estrutural processado em britador tipo mandíbula e o agregado natural (AN), a partir de areia silicosa lavada.

De acordo com alguns autores (PARVIZ, 2012; MEHTA, MONTEIRO, 2016), os grãos menores apresentam maiores quantidades de argamassa residual, sendo esse o principal motivo para a pouca utilização do AMRC, pois o mesmo conduz a uma redução da qualidade do agregado reciclado quando comparado ao agregado natural (SANCHEZ de JUAN; GUTIERREZ, 2009; AKBARNEZHAD *et al.* 2011).

Na Tabela 3 são apresentadas as principais características observadas por Evangelista et al. (2015) do AMRC cujas frações menores que 2 mm apresentavam altos teores de argamassa com pouca presença de AN, e por outro lado, as frações com maiores dimensões ($d < 4$ mm) apresentaram uma quantidade considerável de agregados naturais, quer isolado, quer contendo argamassa aderida.

Tabela 3. Propriedades físicas, químicas e mineralógicas do AMRC

Propriedade	Característica	
	AMRC	AN
Física	Frações de 1 mm a 4 mm apresentam características semelhantes. Partículas angulares, com superfície irregular e topografia acentuada	Morfologia irregular e angular com superfície, aparentemente, compacta
Química	Presença de calcita - provenientes não só de pedra calcária natural, mas também da presença de componentes de concreto carbonatados – além de sílica e feldspato	Isento de elementos eventualmente presentes como impurezas
Mineralógica	Calcita, quartzo, gesso, feldspato de potássio e feldspato sódico foram identificados em todas as frações, juntamente com quantidades residuais de etringita e de Ca(OH)_2 (CH) sob a forma de portlandita	Quartzo e feldspato potássico

Fonte: Adaptado de Evangelista et al. (2015)

A possibilidade de usar agregados miúdos reciclados no CAA também havia sido demonstrada como viável por Kou e Poon (2009), mas utilizando um material proveniente de resíduos de construção e demolição (RCD), que de certa forma, pode comprometer ainda mais as propriedades mecânicas dos novos concretos. No entanto, para compreender a influência de agregados reciclados de concreto em concretos autoadensáveis é interessante conhecer suas principais propriedades.

2.2. Concreto autoadensável

O termo “concreto autoadensável” identifica uma categoria de material cimentício que pode ser moldado nas fôrmas e preencher cada espaço exclusivamente através de seu peso próprio, sem necessidade de qualquer forma de compactação ou vibração externa (COPPOLA, 2000); (ARAÚJO et al., 2003); (MA e DIETZ, 2002); (Ho et al., 2002).

A auto-adensabilidade do concreto em seu estado fresco pode ser descrita, segundo Bosiljkov (2003), como sendo a habilidade de todo o material preencher espaços,

envolvendo as barras de aço e outros obstáculos, através, exclusivamente, da ação da força da gravidade, mantendo uma homogeneidade adequada.

Um concreto só será considerado autoadensável, caso as três propriedades forem alcançadas: a fluidez, a habilidade passante necessária para que a mistura flua intacta entre barras de aço, e a resistência à segregação (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems - EFNARC, 2002).

A fluidez é a propriedade que caracteriza a capacidade do concreto autoadensável de fluir dentro da forma (na horizontal e na vertical), preenchendo todos os espaços sem qualquer esforço externo. Sua habilidade passante refere-se à capacidade do CAA de escoar atravessando as armaduras sem bloqueio do fluxo ou segregação. E a resistência à segregação é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA em se manter coeso no interior da forma sem qualquer separação de seus elementos (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

2.2.1. Principais Características e Propriedades

A especificação da European Federation of National Trade Associations Representing Producers and Applicators of Specialist Building Products (EFNARC), entidade europeia com sede no Reino Unido, descreve o CAA como o mais revolucionário desenvolvimento na construção de estruturas de concreto ocorrido nas últimas décadas.

A sua autoadensabilidade em nível mecânico está relacionada com a reologia do concreto fresco, enquanto que na prática devem ser verificadas as seguintes propriedades de trabalhabilidade: da habilidade de preenchimento, capacidade de passagem através dos obstáculos e resistência a segregação (NEPOMUCENO, 2005). Esses parâmetros são diferentes dos utilizados nas caracterizações convencionais dos concretos frescos (GOMES e BARROS, 2009).

Alguns aspectos relevantes em relação à eliminação da vibração podem ser observados como a redução da mão-de-obra, redução do tempo de concretagem, garantia de maior qualidade das estruturas e redução do ruído promovido.

A capacidade de preenchimento representa a facilidade do CAA no estado fresco se deformar e ocupar todos os espaços, contornando obstáculos apenas através da ação da gravidade, sem necessidade de métodos auxiliares de vibração ou ocorrência de segregação. Desta forma, é garantida a proteção das armaduras pelo CAA e o cumprimento

das espessuras de recobrimento. Esta propriedade é habitualmente avaliada pelo ensaio de espalhamento e/ou do funil V (SILVA, 2013).

A habilidade passante do CAA é alcançada pela sua alta deformabilidade (COPPOLA, 2001) que, por sua vez, é governada pela viscosidade da pasta e da argamassa e as características dos agregados. Observada a presença de segregação, essa propriedade será dificilmente atendida (GOMES e BARROS, 2009).

Segundo Khayat (2000) quando a força para manter o material coeso é insuficiente, pode ocasionar uma separação entre a pasta de cimento e os agregados durante as etapas de transporte e espalhamento do concreto, o que caracteriza a ocorrência de segregação. Torna-se, portanto, imprescindível uma adequada resistência à segregação para garantir a uniformidade na distribuição de todos os componentes da mistura, desde sua produção até a aplicação (COPPOLA, 2001).

A distribuição do agregado graúdo no CAA tem de ser homogênea, com o intuito de conferir uma boa resistência à segregação enquanto o concreto escoar em todas as direções. Deste modo, é fundamental manter uma viscosidade adequada na pasta, reduzindo a água livre na mistura e aumentando o volume de cimento, adições e areia (SILVA e BRITO, 2009). A fração fina presente nos agregados reciclados foi demonstrada por Poon (2004) como capaz de substituir o agente de viscosidade normalmente requerido nas misturas de CAA para controlar a segregação.

Em um caso específico, apresentado no estudo experimental de Kumar et al., (2017) sobre a utilização do agregado graúdo de concreto reciclado e dos agregados miúdos reciclado de concreto em CAA, mostrou que materiais reciclados como agregado graúdo e agregado miúdo recuperados de resíduos de concreto podem ser utilizados em níveis de substituição de 20% para a preparação de misturas de concreto auto adensável. Estas observações estão em consonância com os resultados experimentais relatados na literatura pelos autores Tuyan et al., (2014) e Tang et al., (2016).

Na maioria das vezes, a qualidade do CAA é medida em ensaios em seu estado fresco e não em relação às propriedades mecânicas, como é o caso do concreto convencional. Dentre as propriedades, observa-se que estas não podem ser avaliadas a mediante a execução de ensaios convencionais, como ocorre no ensaio de abatimento do concreto (slump test), utilizado para indicar a consistência da mistura (KHAYAT, 1999).

Durante a especificação do CAA é necessário atentar-se para evitar a ocorrência de retração plástica e fissuras, que podem surgir devido à grande quantidade de materiais

finos empregados na dosagem do material. Por isso, deve-se controlar a cura para que a mesma seja iniciada o mais cedo possível (EFNARC, 2002).

No entanto, o CAA pode ser utilizado tanto em elementos pré-moldados como em estruturas moldadas in loco, possibilitando a sua produção tanto na obra ou em uma central dosadora. Para a sua aplicação, faz-se necessário observar a forma do elemento estrutural, a dimensão e a densidade das armaduras, além do cobrimento necessário, tendo em vista que estes aspectos exercem grande influência no desempenho da estrutura final (EFNARC, 2002).

2.2.2. Materiais Constituintes

Além dos quatro componentes básicos do concreto convencional, ou seja, cimento Portland, agregados (miúdo e graúdo) e água, o CAA demanda o uso de aditivos superplastificantes e/ou modificadores de viscosidade, além de adições minerais, tais como fílers, cinza volante, sílica ativa, entre outras. A seguir são apresentadas considerações sucintas sobre os materiais constituintes do CAA.

2.2.2.1. Cimento

Segundo Gomes e Barros (2009) todos os cimentos Portland, de acordo com as especificações de normas técnicas locais, podem ser utilizados na produção do CAA.

O cimento Portland composto, CP II, por ser o tipo de cimento mais facilmente encontrado no Brasil, e sua composição se encontrar dentro do especificado pela EFNARC, em relação ao teor de C_3A (inferior a 10%), se apresenta como o mais indicado para utilização em concretos autoadensáveis.

Outro aspecto considerado durante a escolha do cimento é a sua interação com o aditivo químico utilizado, pois segundo Mäder et al. (2004) um determinado superplastificante, pode funcionar de maneira adequada com um tipo de cimento e de maneira inadequada com outro. Indica-se nesse processo a utilização de metodologias que testem a interação entre os dois materiais.

O consumo de cimento em composições de CAA variam de 200 a 450 kg/m³, dependendo do tipo de adições (reativas ou inertes), de acordo com Gomes e Barros (2009).

Em relação aos estudos utilizando agregados reciclados de concreto, Kou e Poon (2009), realizaram estudos com CAA e agregados reciclados de concreto mantendo o consumo de cimento fixo em 340 kg/m³. Esse teor foi relativamente mais baixo que o utilizado por Evangelista et al., (2007), que utilizaram cimento CEM II 32.5 com um consumo de 380 kg/m³, Carro-Lopes et al., (2015), que adotaram 400 kg/m³ e Corinadesi et al. (2002) utilizaram consumo de cimento de 500 kg/m³ na produção de CAA com 100% de agregados reciclados.

2.2.2.2. Adições minerais

As adições são materiais minerais finamente moídos que são adicionados ao concreto a fim de lhe conferir propriedades específicas (MEHTA e MONTEIRO, 2014). As adições são utilizadas para melhorar e manter a coesão e a resistência à segregação do CAA, conforme dados da EFNARC (2005). Esses materiais, na visão de Zhu e Bartos (2003) citado por Fochs (2011), são necessários para manter a estabilidade, ou seja, uma suficiente viscosidade da mistura, reduzindo a exsudação e a segregação.

Segundo Tutikian (2004), os materiais finos podem ser pozolânicos, tais quais as cinzas da casca de arroz, a sílica ativa, o metacaulim, a escória de alto forno entre outros, ou não pozolânicos, como a cerâmica moída, o fíler calcário e outros, desde que estes componentes apresentem uma área superficial maior do que o material que estão substituindo.

A sílica ativa é o subproduto do processo da fabricação ferro silício, silício metálico, sendo adicionado na mistura de concreto para obter melhores propriedades mecânicas e de durabilidade. O uso de sílica ativa no concreto é considerado benéfico por causa de sua reatividade, pelo tamanho das partículas ser muito pequeno e por conter altas porcentagens de SiO₂. A sílica ativa é mais fina do que a cinza volante, o que confere um empacotamento denso das partículas, um refinamento no tamanho dos poros e um concreto mais denso. No entanto, as propriedades no estado fresco do concreto podem ser afetadas por causa da presença em excesso de sílica ativa (RAJHANS, 2018).

Khoshkenari et al. (2014) estudaram o efeito dos agregados miúdos reciclados de concreto, de granulometria entre 0-2 mm, na produção de concreto de alta resistência e

concreto de resistência normal. Observou-se que a resistência à compressão e a resistência à tração do concreto podem ser melhoradas pela adição de sílica ativa.

Os autores Grdic et al., (2008) analisaram a influência de cinzas volantes, sílica ativa, calcário e sua combinação em propriedades de concreto autoadensáveis e concluíram que, dentre as três adições, as melhores propriedades são obtidas com sílica ativa.

Os CAA's podem ser produzidos com adições pozolânicas, assim como com as cimentantes normalmente utilizadas nos concretos convencionais (como cinza volante ou escória de alto-forno). Entretanto, as adições pozolânicas ultrafinas, como a sílica ativa, o metacaulim e cinza de casca de arroz, mostram-se mais efetivas no aumento da coesão do CAA, bem como no aumento da resistência e da durabilidade. Misturas ternárias, que fazem uso de combinações de duas adições minerais, também têm sido utilizadas com sucesso.

Com relação às quantidades, Alencar e Helene (2006) comentam que os teores de substituição devem ser menores, quanto mais finas forem as adições, principalmente por conta do aumento do atrito entre as partículas e em determinado volume, o que acarreta em um aumento da viscosidade e coesão da mistura. Além disso, citam que quanto mais rica for a mistura, menores teores serão necessários, pois essas misturas já possuem grande quantidade de finos e, conseqüentemente, seriam mais coesas.

2.2.2.3. Agregados

Os agregados, de forma geral, sempre foram tratados como material de enchimento no concreto, pela ausência de reações químicas complexas quando em contato com a água, recebendo assim, uma importância secundária. Tal fato, no entanto, se mostrou equivocado, uma vez que muitas propriedades, como a trabalhabilidade, resistência mecânica, estabilidade dimensional e durabilidade estão relacionadas com os agregados utilizados (METHA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

De acordo com Melo (2005) para se garantir uma autoadensabilidade adequada no CAA, é necessário reduzir a quantidade de agregado graúdo, priorizando um aumento no teor de partículas finas. O volume total de agregados e a proporção entre agregados miúdo e graúdo são os principais aspectos que podem influenciar na reologia do concreto.

Uma variação que é aceita entre pesquisadores de CAA, é de que o diâmetro máximo característico dos agregados graúdos normalmente utilizados nos CAA é de 20

mm, porém já foram utilizados diâmetros máximos de 40 mm (OKAMURA, 1997). Segundo Tutikian e Dal Molin (2008) é habitual utilizar-se diâmetros máximos compreendidos entre 12,5 e 19 mm. Gomes et al. (2003) utiliza em sua pesquisa agregados graúdos com dimensões máximas entre 10 e 20 mm.

Para a escolha do agregado graúdo, Torales-Carbonare et al. (2003) recomendam agregados graúdos com forma angular e superfície áspera para proporcionar maior aderência com a pasta, contudo Tutikian (2007) indica que deve ser priorizado a escolha por agregados arredondados para melhorar o empacotamento e reduzir o risco de segregação da composição.

Gomes e Barros (2009) explicam que o formato e a distribuição do tamanho das partículas do agregado são bastante importantes e afetam a compactação e o índice de vazios. Agregados com superfícies ásperas e formas angulares apesar de apresentarem melhor aderência com a pasta de cimento poderiam ocasionar em um aumento do consumo de água e redução da trabalhabilidade. Portanto, indica-se em CAA agregados que possuam coeficiente de forma o mais próximo possível de 1 (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Segundo Melo (2005), podem ocorrer alguns problemas no concreto quando a distribuição granulométrica dos agregados não é contínua, tais como um o aumento do consumo de cimento, uma redução da fluidez e existência de mais vazios entre os agregados.

Outra propriedade que deve ser observada é a massa específica, segundo Campos (2017), os agregados comuns possuem em torno de 2,6 a 2,7 g/cm³, agregados leves apresentam valor inferior a 2,0 g/cm³, enquanto aqueles com massa específica maior que 3,0 g/cm³ são considerados pesados. Concretos com elevada fluidez e confeccionados com agregados leves podem apresentar segregação, por flutuação das partículas maiores.

2.2.2.4. Aditivos Químicos

A fim de alcançar alta fluidez e uma durabilidade desejada, certos tipos de aditivos químicos são frequentemente necessários. Um dos principais aditivos químicos é o superplastificante (SP), que pode alterar substancialmente o comportamento reológico do CAA através da dispersão de partículas via repulsão eletrostática e/ou estéricas. Um aumento da relação água/materiais finos pode melhorar a fluidez do concreto, mas

aumentar cegamente essa relação diminuirá as propriedades mecânicas do concreto (HUANG, 2018).

A adição adequada destes aditivos superplastificantes proporciona uma boa trabalhabilidade com uma relação água/aglomerante baixa, que são características essenciais para concretos de alto desempenho (MENDES, 2002).

Segundo Cavalcanti (2006) o uso de 1% de superplastificante em relação à massa de cimento podem ser incorporados a abatimentos de até 250mm, sem causar exsudação e retardamento de pega.

A determinação da dosagem do superplastificante em relação à massa de cimento (sp/c) pode ser realizada através de estudos em pastas e/ou argamassas, a fim de se determinar a dosagem ótima de saturação do superplastificante a ser utilizada no concreto, ou seja, o teor máximo de aditivo capaz de promover aumento da fluidez, pois, acima do qual alguns aspectos negativos podem ocorrer, tais como: segregação e/ou exsudação, fluidez insuficiente para a obtenção do CAA, perda de trabalhabilidade, dentre outros (GOMES, 2002).

2.2.2.5. Água

Quanto maior for o teor de água no concreto, menor será a tensão de escoamento e a viscosidade da mistura, no entanto um aumento desproporcional de água comprometerá a resistência mecânica do concreto. Assim, parte da água de amassamento deve ser substituída por aditivos superplastificantes, para que os requisitos de resistência e durabilidade não sejam afetados, bem como seja alcançada a fluidez necessária para o CAA (CAMPOS, 2017).

A água destinada ao amassamento do concreto será aquela isenta de teores prejudiciais de substâncias tais como óleos, ácidos, sais, matéria orgânica e outras que possam interferir nas reações de hidratação do cimento (SUGAMOSTO, 2007).

Segundo a norma NBR 12655 (1996) a água destinada ao amassamento do concreto deve ser guardada em caixas estanques e tampada, de modo a evitar a contaminação por substâncias estranhas.

2.2.3. Aspectos Reológicos

As características do CAA são muito influenciadas por suas propriedades reológicas, nominalmente a tensão de escoamento (τ_0) e a viscosidade plástica (η). A tensão de escoamento consiste na tensão de cisalhamento mínima necessária para que o escoamento se inicie, e está relacionada ao estado de dispersão das partículas. A viscosidade, por sua vez, representa o declive da reta no gráfico de tensão de cisalhamento por taxa de cisalhamento, sendo um indicativo da estabilidade da mistura (SHEINN et al., 2003).

Em CAA, a tensão de escoamento precisa ser baixa, garantindo o aumento da fluidez, e a viscosidade apresenta-se de forma moderada, a fim de promover a estabilidade necessária. Estes parâmetros são diferentes daqueles definidos para os concretos convencionais, os quais exigem tensões de escoamento muito mais altas e viscosidades muito mais baixas (GOMES, 2002).

Já Ho et al. (2001) apontam que a tensão de escoamento está mais relacionada com a deformabilidade, ao passo que a viscosidade pode ser utilizada como indicação da resistência à segregação. É necessário, portanto, que ambos os parâmetros estejam controlados a fim de se produzir um material de consistência e fluidez adequadas.

A reologia da pasta está bastante relacionada com a reologia do concreto, sendo esta relação maior quando na pasta são incluídas as partículas finas dos agregados, com dimensão semelhante as do cimento e adições. Segundo Menezes (2006) a fluidez e a viscosidade da pasta governam as propriedades de escoamento e movimentação do concreto sob ação do seu peso próprio. Assim pode-se dizer que o estudo da reologia do concreto na fase de pasta pode dar resultados mais precisos e de forma mais simples.

Lima et al. (2014), indicam que a presença de agregados reciclados causa uma diminuição do valor de tensão de cisalhamento e viscosidade plástica em comparação à mistura contendo agregado natural. Além disso, afirma que os agregados reciclados tendem a apresentar uma superfície mais angular e uma maior quantidade de finos, o que resulta em mudanças no comportamento das argamassas no estado fresco.

Banfill (1994) faz um levantamento dos principais fatores que afetam a reologia das argamassas, os quais apresentam efeitos mais representativos do concreto. Os resultados do trabalho são apresentados na tabela 4.

Tabela 4. Efeitos de diferentes materiais na reologia das argamassas (BANFILL,1994).

Ação	Efeito na tensão de escoamento	Efeito na viscosidade plástica
Aumento no volume de água	Redução	Redução
Aumento na quantidade de agregado miúdo	Aumento	Aumento
Aumento na quantidade de cimento	Aumento	Aumento
Aumento na finura do agregado miúdo	Aumento	Aumento / Sem efeito
Emprego de aditivo plastificante	Redução	Sem efeito
Emprego de aditivo incorporador de ar	Sem efeito	Redução
Substituição de parte do cimento por cinzas volantes	Redução	Redução
Substituição de parte do cimento por sílica ativa	Aumento	Redução

Segundo o demonstrado pela tabela 4, dois materiais interessantes durante a dosagem seriam o aditivo plastificante, pois reduziria a tensão de escoamento necessária para garantir a fluidez sem causar efeitos na viscosidade, e o teor de finos no agregado miúdo que ajudaria a controlar a coesão da mistura.

Busnello e Santos (2008) afirmam que o CAA deve apresentar um valor moderado de viscosidade de forma a promover adequada resistência à segregação, pois viscosidades muito baixas podem propiciar instabilidade da mistura, ao mesmo tempo em que valores muito altos de podem prejudicar a capacidade de preenchimento do CAA, dificultando a passagem dos agregados pela armadura, além de prejudicar o acabamento superficial.

Quanto à diminuição da tensão de escoamento, Pereira-de-Oliveira (2014) concluiu que para concretos com agregados reciclados essa deficiência implica na necessidade de adicionar uma quantidade maior de superplastificante. Campos (2017) também ratifica essa ideia ao concluir em seu estudo que a perda de fluidez ocasionada pelos agregados reciclados nas argamassas e concretos, pode ser corrigida com o incremento no teor de aditivo superplastificante na dosagem.

2.2.4. Vantagens e aplicação

A redução de custos observada no CAA pode ser decorrente: da redução da necessidade de aplainamento das superfícies devido à sua propriedade autonivelante nos elementos horizontais; e da menor necessidade de acabamento nas superfícies dos elementos verticais, que são suaves, uniformes, livres de imperfeições e sem descoloração quando se utilizam formas de boa qualidade e controle da técnica de aplicação (NUNES, 2001).

No entanto, uma avaliação econômica visando apenas a produção do material pode demonstrar altos custos, os quais são consequência dos tipos de materiais empregados na sua composição, como os aditivos, e por conta do aumento do controle de qualidade necessário na produção. Segundo Ho et. al. (2001), dependendo da composição e do controle de qualidade na produção, o aumento do custo pode ser bem significativo se comparado com o CCV. Também Melo (2005) afirma que o CAA apresenta altos custos iniciais quando se pensa apenas na avaliação econômica da produção do mesmo.

As características do CAA fazem com que o seu campo de aplicação consista especialmente de regiões onde há dificuldade de se proceder ao adensamento. Dentre as principais estruturas que se enquadram neste aspecto podem ser citados os elementos de formas complexas, de alta densidade de armadura ou regiões de difícil acesso. Sua aplicação também pode ser viável em obras muito grandes, aumentando a velocidade de construção, ou ainda quando é necessária uma redução no ruído produzido, o que é observado em construções localizadas em áreas urbanas (KHAYAT, 1999).

Um destaque deve ser dado quanto à utilização do CAA em indústrias de pré-moldados de concreto. Alguns dos grandes problemas que estes segmentos apresentam estão relacionados ao processo de vibração e aos ruídos decorrentes da produção, e a aplicação do concreto convencional, que podem ser minimizados com o CAA (GOMES e BARROS, 2009).

Walraven (2003) aponta que há uma redução estimada em 10% no consumo de energia, devido à eliminação da vibração; maior durabilidade das formas, redução de cerca de 10% nos custos de manutenção; e redução das doenças dos trabalhadores, estimada em 10%. Além disso, a repetitividade de processos observada na indústria de pré-moldados favorece a implementação da produção do CAA, conforme cita Skarendahl (2003).

Nessa premissa, os autores Salesa et al., (2017) estudaram a possibilidade de multi-reciclar o concreto dentro da indústria de pré-moldados, abordando o uso de

agregados graúdos reciclados de concreto após os ciclos de reciclagem na produção de um novo material. Seus resultados mostraram que o desempenho de concretos reciclados foi melhor do que os relatados em pesquisas anteriores, o que, segundo os autores, ocorreu devido à alta qualidade dos agregados reciclados provenientes de peças pré-moldadas.

2.3. Avaliação do concreto autoadensável

Alguns dos métodos de ensaios mais utilizados para a caracterização das propriedades do CAA são: Ensaio de espalhamento do cone de Abrams (Slump Flow e Slump flow T50), Funil V (V-Funnel), Caixa L (L-Box), Tubo em U, anel Japonês (J-Ring) e a coluna de Segregação. Para o estabelecimento de parâmetros de capacidade de preenchimento são utilizados os ensaios de espalhamento no cone de Abrams e Funil V, para os parâmetros de capacidade de passagem entre as armaduras é utilizada a Caixa L, e finalmente para a verificação quanto à presença de segregação é utilizado o ensaio do Tubo em U (CAVALCANTI, 2006).

Entretanto, alguns problemas a serem resolvidos estão relacionados à reprodutibilidade dos resultados na sua aplicação, à variação dos resultados em função do operador, diminuindo sua confiabilidade, e à falta de normalização (GIBBS, 2004).

Para o estabelecimento de parâmetros de capacidade de preenchimento são utilizados os ensaios de espalhamento no cone de Abrams e Funil V, para os parâmetros de capacidade de passagem entre as armaduras é utilizada a Caixa L, e finalmente para a verificação quanto à resistência à segregação é utilizado o método da Coluna de Segregação.

É importante destacar, em relação a estes ensaios, que pode ocorrer variação significativa dos resultados em função da forma de mistura e da temperatura (BRAMESHUBER, 2004; GIBBS, 2004). Neste sentido, Brameshuber (2004) sugere a necessidade de estudos que especifiquem várias faixas de flutuação das propriedades do CAA no estado fresco, de acordo com a variação da temperatura.

EFNARC (2002) indica que uma das principais dificuldades em utilizar-se tais ensaios é de que eles precisam medir as três propriedades requeridas no CAA, e nenhum dos ensaios propostos consegue medir isoladamente os três itens.

De acordo com Gomes et al. (2008), mesmo todos podendo serem aplicados no local da obra, o ensaio de espalhamento com o tronco-cônico de Abrams, muitas vezes, é o

único usado. Ainda segundo eles, apenas este ensaio não pode descrever se o CAA foi alcançado ou não (pois só avalia a capacidade de preenchimento) e isto pode estar caracterizando um erro na análise da capacidade de passar entre obstáculos.

No Brasil, foi aprovada uma norma para classificação, controle e aceitação do CAA no estado fresco, a NBR 15823-1 (2017). Nesta norma são estabelecidos os requisitos para classificação, controle e aceitação do concreto auto adensável no estado fresco, além de definir e estabelecer limites para as classes de autoadensibilidade. Também são prescritos os ensaios para a verificação das propriedades do concreto auto adensável.

2.3.1. Ensaio de Espalhamento (Slump Flow Test e Slump Flow T50)

Este é um ensaio bastante simples, cuja descrição está especificada na norma NBR 15823-2 (2017), e é feito com as mesmas ferramentas utilizadas para o ensaio de abatimento do concreto convencional (slump test), conforme a Figura 3.

Sendo, neste ensaio, necessária uma base maior (a qual deve ser um quadrado de 1m², que não absorva água e nem provoque atrito com o concreto), já que o CAA se espalha muito e requer mais espaço para a leitura do ensaio.

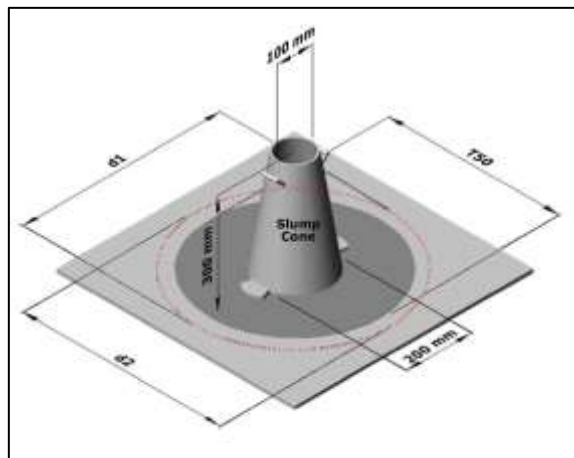


Figura 3. Ensaio de espalhamento do cone de Abrams (CAVALCANTI, 2006).

A média de duas medidas perpendiculares do concreto espalhado resulta no valor do parâmetro de extensão final do fluxo. O tempo medido em segundos, para o concreto alcançar um diâmetro de 50 cm também é determinado e chamado de T50.

A Tabela 5 fornece os valores recomendados por diferentes pesquisadores para o diâmetro médio do slump flow e para o tempo necessário para o concreto fluir dos 200 aos 500 mm (T50), respectivamente.

Tabela 5. Valores de espalhamento e tempo (T50) recomendados por diversos autores (Adaptado de Tutikian, 2004)

REFERÊNCIAS	ESPALHAMENTO (mm)		TEMPO (s)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
EFNARC (2002)	650	800	2	5
Gomes (2002)	600	700	4	10
Gomes et al.(2003a)	600	750	3	7
Araujo et al. (2003)	650	800	2	5
Rigueira Victor et al. (2003)	600	800	3	6
Barbosa et al. (2002)	550	700	3	7
Peterssen (1999)	650	725	3	7
Coppola (2000)	600	750	5	12
Palma (2001)	650	750	3	6

Os autores Kou e Poon (2009), ao estudarem as propriedades do concreto auto adensável com agregados (grãos e miúdos) reciclados de concreto, observaram que o diâmetro do fluxo de abatimento aumentou com o aumento dos teores de agregados miúdos reciclados. Os autores indicaram que tal consequência se deu pelo aumento na relação água/cimento, a fim de compensar a absorção de água superior dos agregados reciclados em comparativo aos agregados de origem natural.

Aslani et al. (2018) utilizaram uma mistura de agregados reciclados de concreto e agregados de borracha, e observaram que uma substituição de 10% de agregados reciclados não demonstrou alteração no diâmetro de espalhamento. O aumento do conteúdo de agregados reciclados para 20%, 30% e 40% resultou em decréscimos abaixo de 10%. No entanto, também salientaram que os valores satisfizeram a faixa de valores sugerida (600 a 700 mm), conforme delineado pelas Diretrizes Europeias (2005). Bandi et al. (2016) relatou recentemente uma observação similar feita com misturas de CAA contendo agregados de concreto reciclado.

Os resultados do slump test no trabalho de Carro-López et al. (2015) exibiram a mesma tendência decrescente à medida que a substituição de areia natural por material reciclado aumentava. No entanto enfatizaram que as misturas de 0% e 20% apresentaram um comportamento semelhante, enquanto as misturas de 50% e 100% apresentaram reduções severas. Esta tendência foi similar aos resultados do T50, onde as misturas de 0%

e 20% se comportaram de maneira semelhante e a redução tornou-se mais acentuada em proporções de substituição mais altas.

Khodair e Bommareddy (2017) mostraram que a substituição de agregado graúdo natural por teores de 25, 50 e 100% de agregado graúdo reciclado de concreto reduziu os valores de abatimento em 0,8%, 5,7% e 9,8%, respectivamente, comparado com os traços sem agregado reciclado.

2.3.2. Ensaio do Funil-V (V funnel test)

Este equipamento mede a fluidez do concreto, assim como o slump flow test e o slump flow T50cm test para agregados graúdos de diâmetro máximo de 20mm. O detalhamento deste ensaio foi fundamentado nos procedimentos da norma NBR 15823-5 (2017). Expressa uma avaliação da capacidade do concreto de passar por seções estreitas, sendo também um indicativo da viscosidade da mistura. Pode também dar indícios sobre a frequência de contato entre as partículas, quando submetidas à deformação imposta por uma restrição (SUGAMATA et al., 2003).

O ensaio consiste em medir o tempo que a amostra de aproximadamente 10 litros de concreto necessita para fluir totalmente através do orifício inferior do funil, onde tal seção deve ter uma dimensão mínima de 3 vezes o tamanho máximo do agregado. Pode ser realizado em argamassas com um funil de dimensões reduzidas quando comparado ao funil utilizado em concreto (Figura 4).

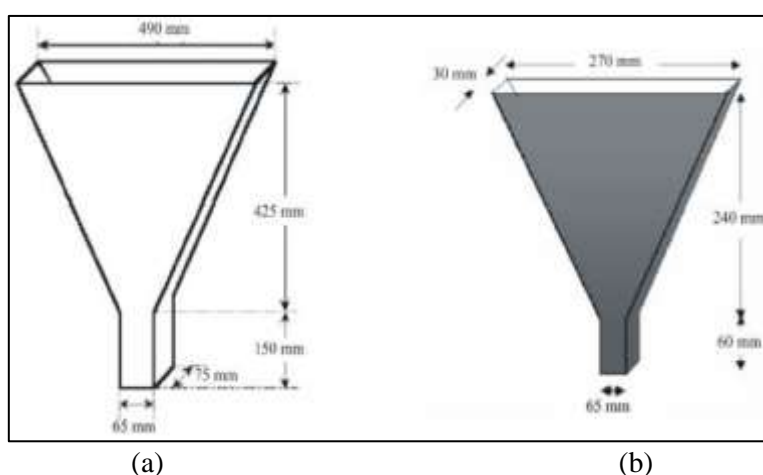


Figura 4. Funil-V: (a) concreto; (b) argamassa (NUNES, 2001).

Quanto maior a relação água cimento, menor é esta frequência de contato entre as partículas, e menor é o tempo de escoamento no funil. O aumento no teor de superplastificante não gera grande influência no tempo de fluidez medido por este ensaio.

Este ensaio também mede a viscosidade e a tendência à segregação da mistura. O concreto normalmente estará segregando quando o tempo para esvaziar o funil é grande ou quando ocorre o bloqueio do funil.

Brameshuber (2004) aponta que o Funil-V é mais representativo da viscosidade do que o T50, especialmente quando os valores resultantes são baixos.

Tabela 6. Limites de resultados e dimensões para o v-funnel test, segundo diversas referências (Tutikian, 2004).

REFERÊNCIAS	TEMPO (s)		DIMENSÕES (mm)			
	MÍNIMO	MÁXIMO	A	B	C	D
EFNARC (2002)	6	12	490	425	150	65
Gomes (2002)	10	15	515	450	150	65 ou 75
Gomes et al. (2003a)	7	13	515	450	150	65
Araújo et al. (2003)	6	12	-	-	-	-
Noor e Uomoto (1999)	9,5	9,5	490	425	150	70
Peterssen (1998 e 1999)	5	15	550	450	120	75

Pereira-de-Oliveira et al. (2014) ao realizarem substituições de 20%, 40% e 100% de agregado gráudo natural por agregado gráudo reciclado de concreto, constataram um aumento no tempo de escoamento com o aumento do teor de substituição. Salientando uma disparidade no teor de 40% de substituição, o qual apresentou um tempo maior de escoamento, mas sendo relacionado ao fato deste traço apresentar uma redução na relação a/c comparativamente às demais.

Señas et al. (2016) observaram que a viscosidade plástica avaliada pelo método do funil-V aumentou à medida que a porcentagem de agregado reciclado em substituição ao natural aumentava também. Este efeito sendo mais significativo em misturas contendo mistura areia natural, comparativamente ao traço utilizando como agregado natural o cascalho arredondado.

Carro-Lopes et al. (2015) observaram em seu estudo com agregados miúdos reciclados de concreto em concretos autoadensáveis que algumas das misturas sofreram obstruções no gargalo do dispositivo (Funil-V), o que resultou em tempos de passagem

mais longos. A tendência geral, no entanto, mostrou uma perda de fluidez ao longo do tempo, e esse efeito se manifestou mais claramente após 45 min.

2.3.3. Ensaio da Caixa-L (L-Box test)

Neste ensaio, determina-se a capacidade do concreto de passar por restrições, simulando-se as armaduras, bem como sua deformabilidade, resistência ao bloqueio e resistência à segregação. O ensaio da Caixa em L foi normalizado pela norma NBR 15823-4 (2017). A determinação é feita a partir do preenchimento da parte vertical da caixa em formato L, permitindo-se passagem do material para a parte horizontal após este escoar pelas barras verticais existentes (Figura 5).

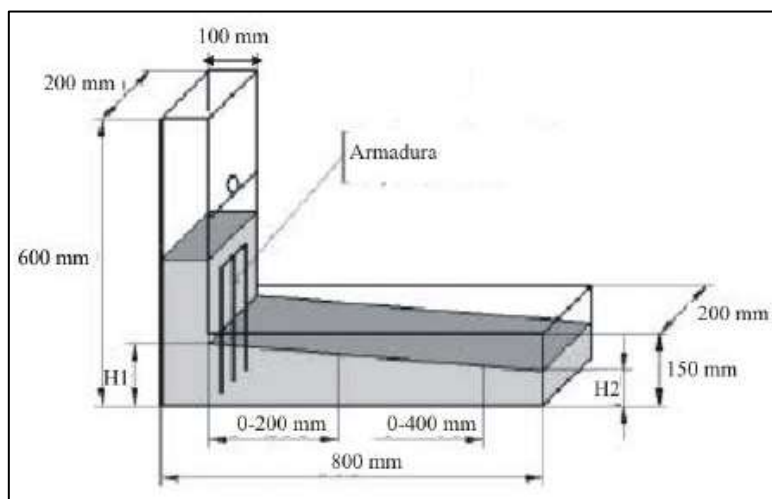


Figura 5. Ensaio da Caixa-L (EFNARC, 2002).

No estudo desenvolvido por Petersson (1999), verificou-se que o número ideal de barras que devem ser empregadas neste ensaio é de 3, podendo-se variar o diâmetro e, conseqüentemente, o espaçamento entre elas. Com isto, tem-se a avaliação da capacidade do concreto de passar pelas armaduras, o que é um bom indicativo do volume mínimo de pasta, em função da granulometria do agregado graúdo, para que seja evitado o bloqueio.

Devem-se medir as alturas, inicial (H1) e final (H2), indicadas na Figura 6, onde $H2/H1$ é o valor procurado, que deve se situar entre 0,80 e 1,00, valor adotado pela maioria dos pesquisadores, como indicado na Tabela 7.

Tabela 7. Limites de resultados e dimensões para o ensaio da caixa em L, segundo diversas referências (Tutikian, 2004).

REFERÊNCIAS	TEMPO (s)			DIMENSÕES (mm)			
	H2/H1	T20 (s)	T40 (s)	A	B	C	D
EFNARC (2002)	0,80	-	-	100	200	600	800
Gomes et al. (2003a)	0,80	0,5-1,5	2-3	100	200	600	700
Araújo et al. (2003)	0,80	-	-	-	-	-	-
Rigueira Victor et al. (2003)	0,80	<1,50	<3,50	-	-	-	-
Peterssen (1998 e 1999)	0,80	-	-	100	200	600	700
Tviksta (2000)	0,85	-	-	100	200	600	-
Coppola (2000)	0,90	-	-	120	300	600	780
Palma (2001)	0,80	-	3 a 6	-	-	-	-

Por conta da dificuldade em se cronometrar o tempo gasto pelo CAA para atingir a marca dos 20cm (T20) e dos 40cm (T40), devido ao espaço de tempo curto entre elas, esta medição se mostra pouco operacional, sendo muitas vezes omitida (ALENCAR, 2008).

Carro-Lopez et al. (2015), indicaram o ensaio da caixa-L como sendo o procedimento experimental mais comum para avaliar a habilidade passante, e ao avaliarem a reologia dos traços de concreto autoadensável com agregado miúdo reciclado de concreto, observaram que depois de 45 min todas as misturas apresentaram redução considerável na trabalhabilidade da mistura.

Em seu estudo, Omrane et al. (2017), substituiu 50% da massa de agregado natural (miúdo e graúdo) por agregados reciclados de concreto, e caracterizando a capacidade de passagem através do ensaio da caixa-L, observou que todos os traços obtiveram resultados com razões de altura superiores a 80%.

Grdic et al. (2010), também utilizaram como parâmetro para avaliação da habilidade passante, o ensaio da caixa-L, utilizando substituições do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto. As alterações que os autores realizaram foram nas relações a/c das misturas, onde o traço sem agregado reciclado apresentou a/c=0,41 e o traço com substituição total a/c=0,43, justificado pela elevada absorção do agregado reciclado.

Contudo, o ensaio da Caixa em L, ainda segundo Alencar (2008), permite a verificação visual da capacidade de preenchimento dos espaços e auto-nivelamento do

CAA e afirma que se o CAA for aprovado neste ensaio, provavelmente irá obter bons resultados nos demais ensaios para a verificação da habilidade de passar por obstáculo, a exemplo do Anel-J e da Caixa em U.

Corroborando com esta afirmação, Alencar e Helene (2006), através de estudo experimental realizado, consideraram o ensaio da Caixa em L como sendo o mais exigente para a qualificação do CAA.

2.3.4. Ensaio da Coluna de Segregação (Column Segregation test)

O ensaio é normalizado pela NBR 15823-6 (2017), e através da ASTM C1610/C1610M-14 (2014).

O ensaio consiste na determinação da resistência à segregação do concreto auto adensável, pela diferença das massas de agregado graúdo existentes no topo e na base da coluna de segregação. O equipamento pode ser constituído de um tubo de PVC, de diâmetro nominal de 200 mm de diâmetro e 660 mm de altura total, seccionado em três partes.

A ASTM C1610/C1610M-14 (2014) indica que o método de ensaio de laboratório é um procedimento para determinar o potencial estático de segregação, onde uma composição é geralmente considerada aceitável se o percentual de segregação é menor que 10%.

A Figura 6 ilustra o equipamento e indica suas dimensões padronizadas.

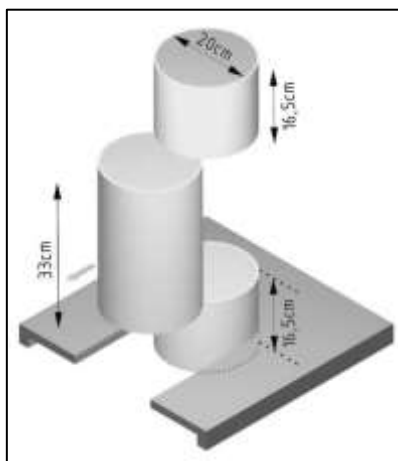


Figura 6. Coluna de segregação (Alencar, 2008).

A segregação avaliada por este ensaio é classificada como estática, já que conforme Bethmont et al. (2009), a segregação é definida como estática quando ocorre

após o concreto fresco ter sido lançado nas fôrmas e, dinâmica, quando esta ocorre durante o lançamento.

2.4. Métodos de dosagem

Os métodos de dosagem do CAA diferem muito dos utilizados para os concretos convencionais, mas também são empíricos. No CAA as dosagens das misturas são comandadas pelas propriedades de fluxo no estado fresco. A partir do desenvolvimento do CAA no Japão surgiram diversos métodos de dosagens. Um dos métodos que merece destaque é o de Okamura e Ouchi (2003).

O método busca alcançar a autoadensabilidade baseando-se não apenas na alta deformabilidade da pasta ou da argamassa, mas também na resistência à segregação entre o agregado graúdo e a argamassa, quando o concreto flui através de uma zona confinada por barras de aço.

O método experimental considera que o concreto consiste em duas fases: argamassa e agregado graúdo; onde os componentes da pasta: relação água/materiais finos e aditivo superplastificante, tornam-se decisivos para a obtenção da autoadensabilidade do CAA, além de garantir sua resistência. Okamura e Ozawa (1995) citado por Okamura e Ouchi (2003) empregaram os seguintes métodos para alcançar a autoadensabilidade:

- a) Limitada quantidade de agregados;
- b) Baixa relação água/cimento (a/c);
- c) Altas dosagens de aditivos superplastificantes.

Ainda segundo os autores do método, a frequência de colisão e o contato entre as partículas dos agregados podem aumentar à medida que a distância relativa entre as partículas diminui e então a tensão interna pode aumentar quando o concreto é deformado, particularmente próximo a obstáculos, resultando no bloqueio dos agregados. Portanto, limitar o conteúdo de agregados graúdos, cujo consumo de energia é particularmente intenso, a um nível inferior ao normal, seria eficaz para evitar esse tipo de bloqueio.

No entanto, Shi (2015) em seu artigo de revisão sobre métodos de dosagem para concretos autoadensáveis, afirmou que por se tratar de um método de dosagem empírico, baseado em dados empíricos envolvendo o conteúdo de agregados graúdos e miúdos, volume de água e material cimentício e a dosagem de superplastificante, para determinar as

proporções iniciais da mistura, são requeridos vários traços experimentais e ajustes para alcançar as melhores estimativas de mistura.

Outro método utilizado na produção de CAA é o de Tutikian (2004) segue os preceitos propostos por De Larrard (1999) para a definição dos materiais, os conceitos de O'Reilly (1992) para a determinação do empacotamento granular máximo, os conceitos de Helene e Terzian (1992) com o diagrama de dosagem do IPT/EPUSP, além dos conceitos de Tutikian (2004) para a dosagem de CAA.

Este procedimento pode ser apresentado, de forma resumida, nas seguintes etapas: escolha dos materiais; determinação do esqueleto granular, determinação da relação água/cimento ou percentual de aditivo superplastificante; mistura dos traços rico, intermediário e pobre; e determinação das propriedades mecânicas e de durabilidade nas idades requeridas. As etapas do método de dosagem podem ser observadas no fluxograma apresentadas na Figura 7.

Basicamente, os materiais utilizados na confecção do CAA são os mesmos do CCV (agregado graúdo, agregado miúdo, cimento, água) com o acréscimo de um material com granulometria inferior ao agregado miúdo (finos), aditivo superplastificante e, opcionalmente, aditivo modificador de viscosidade (VMA), podendo ainda haver a inserção de outras classes de agregado.

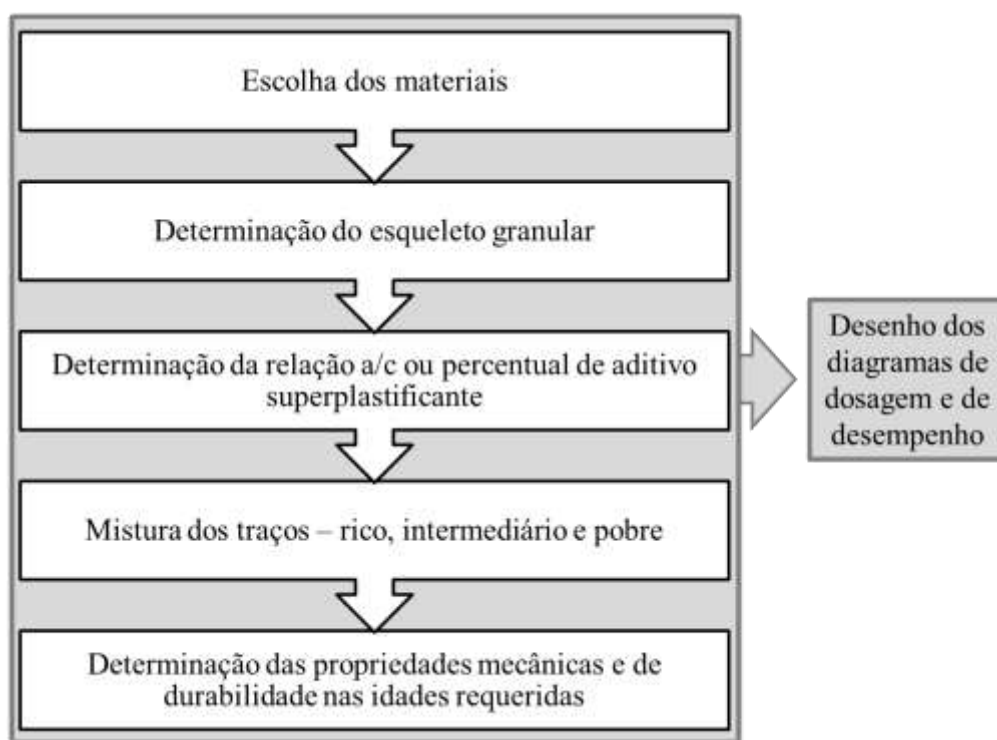


Figura 7. Resumo do método de Tutikian (2007).

Para a escolha do agregado graúdo Tutikian (2007) indica que deve ser priorizada a escolha de agregados arredondados para melhorar o empacotamento e reduzir o risco de segregação da composição.

A determinação experimental do teor ideal de argamassa seca é realizada conforme método do IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992), sem aditivos e finos, e deve ser mantido constante até o final da dosagem do CAA. Em função do fino escolhido: não pozolânico (areia fina, fíler calcário, entre outros.), pozolânico ou cimentante (cinza de casca de arroz, matacaulim, sílica ativa, entre outros.), o método especifica equações que devem ser utilizadas para a determinação dos parâmetros para compor o traço e para o desenho da curva de dosagem, esclarece Tutikian e Dal Molin (2008).

Na etapa da determinação do esqueleto granular se utiliza de uma sequência gradativa de testes de compacidade, cujos materiais, primeiramente os de maior granulometria, são misturados, alterando-se a proporção entre eles. Por exemplo, 10% de um material A e 90% de um material B, depois 20% do material A e 80% do material B, em seguida 30% de A e 70% de B e assim sucessivamente. Dependendo do nível de precisão as proporções podem ser mais ou menos espaçadas.

Então se verifica qual a proporção obteve maior massa unitária e menor índice de vazios dos dois materiais de maior granulometria. Com a determinação do esqueleto granular finalizado existe boa probabilidade do CAA não segregar e não ter excesso de material fino.

A determinação da relação a/c é feita tomando-se como referência as tabelas da NBR 6118 (2014), observando a classe de agressividade ambiental e o tipo de concreto. Já o percentual de aditivo superplastificante é feito contando com a experiência do responsável e com base em outros concretos similares

Tanto a determinação da relação a/c quanto o percentual de aditivo superplastificante devem ser confirmados experimentalmente. Então se experimenta gradativamente o teor de aditivo superplastificante até encontrar o percentual ideal. Na dosagem, o aditivo pode ser adicionado na ordem de 0,1 em peso do cimento, sendo realizado pelo menos um ensaio para cada porcentagem de aditivo superplastificante.

Em seguida devem ser escolhidos, no mínimo, três traços-base para o desenho do diagrama de dosagem: um rico, um intermediário e um pobre. Com a realização das curvas e conseqüente determinação dos coeficientes de correlação para uma família de concretos, será possível dosar qualquer mistura desejada com os mesmos componentes. Tutikian e

Dal Molin (2008) comentam que deve-se manter o teor de argamassa constante em massa em todos os traços realizados.

Em seguida são realizados os ensaios para verificação das propriedades mecânicas e/ou das propriedades de durabilidade a fim de se determinar as propriedades requeridas, como por exemplo: resistência à compressão, tração, velocidade ultra-sônica, módulo de elasticidade, penetração de íons cloretos, absorção de água, etc.

O ponto final do método é a determinação do diagrama de dosagem, sendo necessário o cálculo das equações de comportamento para cada uma das propriedades estudadas. O diagrama de dosagem relaciona no primeiro quadrante: a resistência à compressão nas diversas idades ensaiadas, com a relação a/c; no segundo quadrante: a relação a/c com a proporção 1:m; no terceiro quadrante a proporção 1:m com o custo e consumo de cimento por metro cúbico de concreto; e no quarto quadrante (que divide a resistência à compressão com o eixo y positivo) foi relacionado o teor de argamassa seca com o consumo de cimento, já que o teor de argamassa seca deixou de ser constante para toda a família.

Um exemplo do diagrama de dosagem resultante do método de dosagem de Tutikian (2004) pode ser observado na Figura 8.

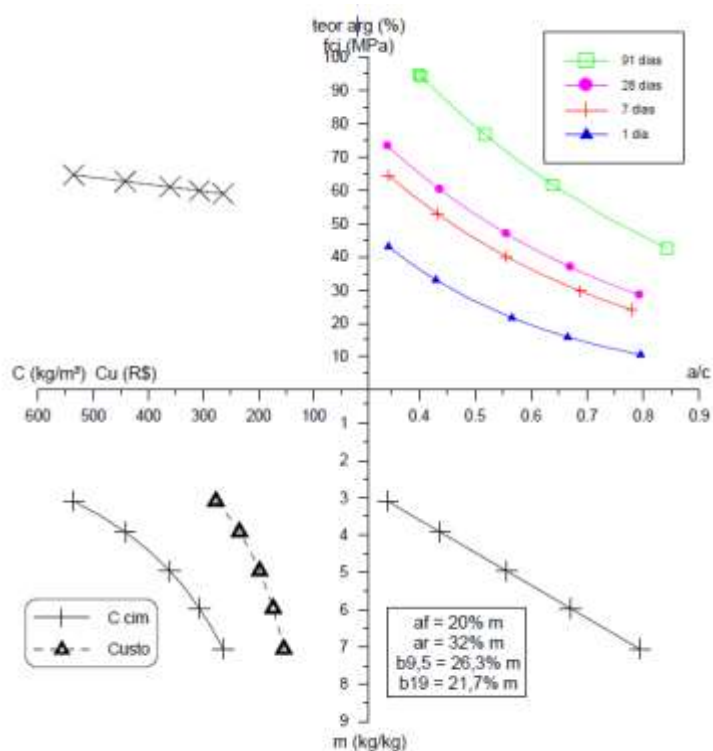


Figura 8. Exemplo de diagrama de dosagem com o α variando (TUTIKIAN, 2007).

Segundo o próprio autor do método de dosagem, observa-se que o aumento do teor de argamassa pode acarretar em problemas com a redução do módulo de elasticidade e aumento da retração por secagem (TUTIKIAN, 2007). O teor de argamassa sendo um fator fixo, também apresenta desvantagens sendo sugerida pelo autor uma correção para a adequação do CAA.

O método proposto nos estudos de Gomes et al. (2003), determina o procedimento experimental para a produção de um concreto autoadensável de alta resistência. O método em seus critérios define a busca pelo atendimento de uma resistência mínima a compressão e por uma série de cumprimento de requisitos técnicos do concreto no seu estado fresco.

Na sua lógica, objetiva-se o uso de quantidades mínimas de superplastificante e cimento, segundo Cavalcanti (2006) essa metodologia constitui uma extensão do estudo desenvolvido por De Larrard em 1992 e Toralles et al. em 1998.

Neste método pode-se assumir que a composição da pasta não causa interferência na determinação da proporção entre os agregados, o que permitiria a execução da composição de cada fase sem influência da outra. Uma pasta com um volume mínimo associada a um esqueleto granular são necessários para garantir as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido (GOMES e BARROS, 2009).

O modelo sugere que a viscosidade e a fluidez da pasta governem o comportamento de fluxo do concreto. De acordo com Nunes et al., (2011) o papel chave da pasta é demonstrado pelo forte efeito dos materiais finos, da relação água/cimento e da dosagem do superplastificante sobre a trabalhabilidade do concreto.

De acordo com Lisbôa (2004), para o concreto fluir suavemente entre obstáculos era imperativo que a tensão de cisalhamento na pasta, fosse pequena o bastante para permitir tal deslocamento relativo entre as partículas dos agregados. Os resultados experimentais indicaram que a tensão de cisalhamento necessária para um grande deslocamento relativo dependia da relação água-cimento da pasta (a/c).

Em função disso foi encontrado um valor ótimo para a relação água/cimento, de forma a minimizar a tensão de cisalhamento. No entanto, ao se ajustar o valor da relação água/cimento, alcançando uma melhoria na capacidade de fluxo da pasta de cimento, simultaneamente notava-se uma redução da viscosidade, sendo um fator negativo em função da diminuição da resistência à segregação do concreto.

Sendo assim, a presença de um aditivo superplastificante tornou-se imprescindível de forma a alcançar as propriedades de autoadensibilidade, sem a ocorrência de segregação. A utilização do superplastificante na pasta acarretou em um aumento da

capacidade de fluir, tendo como consequência adversa uma pequena diminuição simultânea da viscosidade.

Na metodologia proposta por Gomes et al. (2003), são observadas duas fases distintas, tratadas individualmente, que se combinam posteriormente na etapa de geração do concreto. Trata-se do estudo do esqueleto granular e o estudo da pasta de cimento, que são otimizadas individualmente, a fim de se obter as propriedades desejadas (CAVALCANTI, 2006).

Este método propõe algumas diretrizes que devem ser seguidas, tais como:

- a) Ter a relação água/aglomerante baixa ($a/agl < 0,40$);
- b) Otimizar as relações aditivo superplastificante/cimento (sp/c) e finos/cimento (f/c) para que se obtenha pasta com alta fluidez e boa coesão;
- c) Determinar um esqueleto granular com mínimo de vazios possível;
- d) Determinar uma pasta com as características de auto-adensabilidade do concreto fresco, assim como a resistência à compressão.

Um ponto interessante é que segundo o método, os componentes devem ser, sempre que for uma possibilidade, obtidos entre os disponíveis localmente, excetuando casos específicos onde os materiais locais não satisfaçam as características esperadas, a fim de que o concreto seja viável economicamente (TUTIKIAN, 2004).

No método são designadas as relações água/cimento, sílica ativa/cimento, superplastificante sólido/cimento e fíler/cimento, respectivamente por: a/c, sf/c, sp/c e f/c. No caso de um concreto de alta resistência, a dosagem de sílica ativa ou microssílica ou fumo de sílica deverá ser fixado em 10 % em massa de cimento, levando em consideração que este é um percentual ótimo para um concreto de alta resistência em termos de benefícios e custo.

A composição da pasta é feita com uma relação a/c fixada entre 0,35 e 0,40, conforme resistência e durabilidade desejada. A relação sf/c (sílica ativa/cimento) é fixa em 0,1 em relação à massa do cimento, enquanto que as relações sp/c e f/c são determinadas em relação às propriedades do concreto no estado fresco.

A Figura 9 apresenta um esboço com os diferentes passos adotados na metodologia.

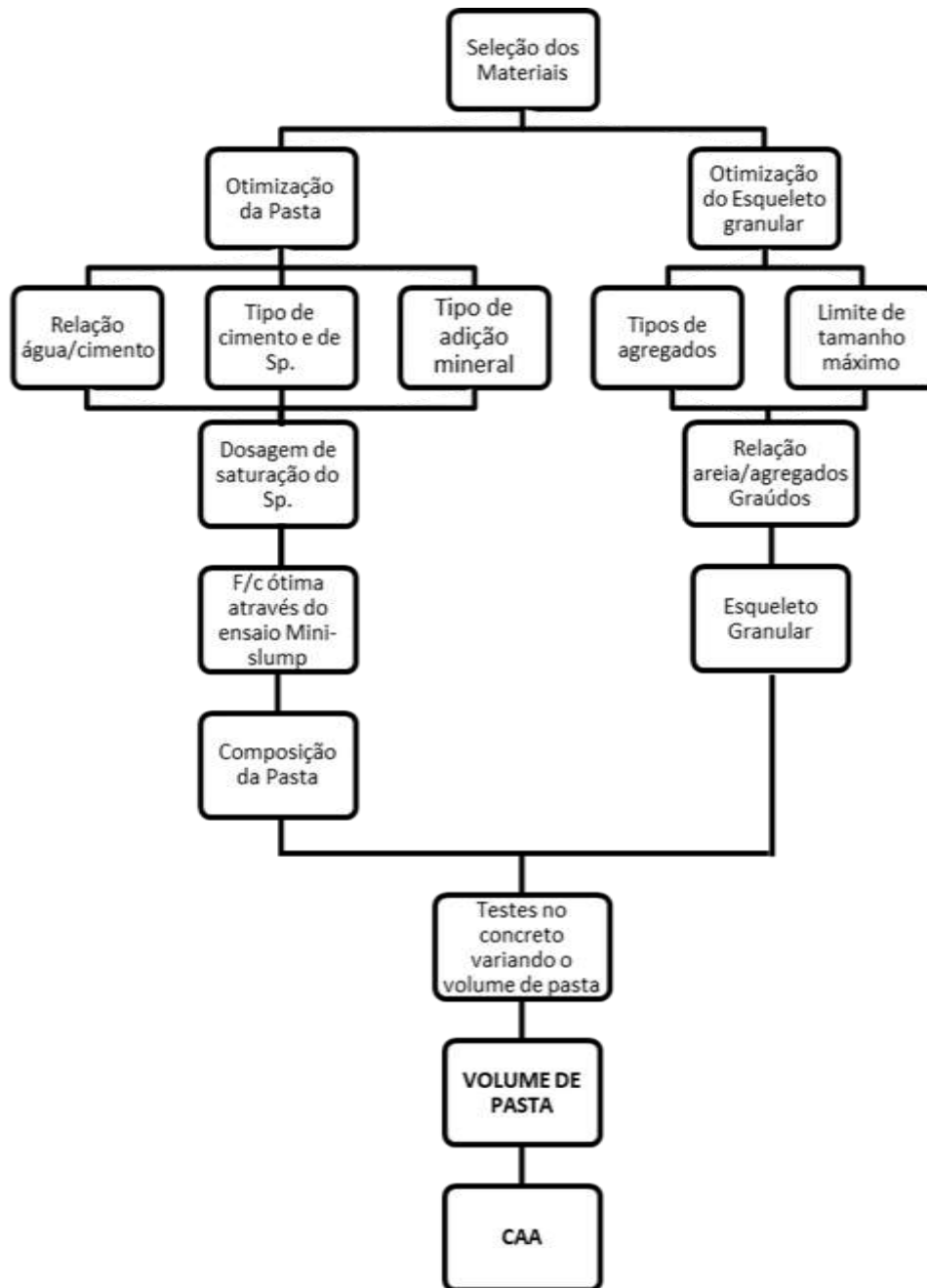


Figura 9. Diagrama que descreve o método de dosagem (adaptado de GOMES e BARROS, 2009).

Para definição do ponto de saturação do superplastificante (sp/c) e a quantidade de fíler (f/c), Gomes sugere dois tipos de ensaio, o teste com o cone de Marsh e o mini slump ilustrados na Figura 10 e 11.

A dosagem de superplastificante nas pastas é determinada através de ensaios do cone de Marsh, com abertura de saída de 8 mm de diâmetro, conforme a Figura 10, e de acordo com as recomendações da EN 445 (Norma Européia – Grautes para bainhas de protendidos. Métodos de Ensaio, 1996). Tal procedimento consiste em introduzir 1 litro de

pasta no cone e medir o tempo (T) decorrido, para 500 ml de pasta fluir completamente pela abertura inferior do cone.

Segundo Gomes (2002), Toralles-Carbonari et al. (1996) usou um cone com $d = 8$ mm, no teste de performance da pasta com volumes $V = 800$ ml e $v = 200$ ml; De Larrard et al. (1997) usou um cone de $d = 12,5$ mm, no teste de performance da argamassa com volumes $V = 1000$ ml e $v = 500$ ml; e Aïtcin (1998) usou um cone de $d = 5$ mm em testes de pastas, com volumes $V = 1200$ ml e $v = 500$ ml.

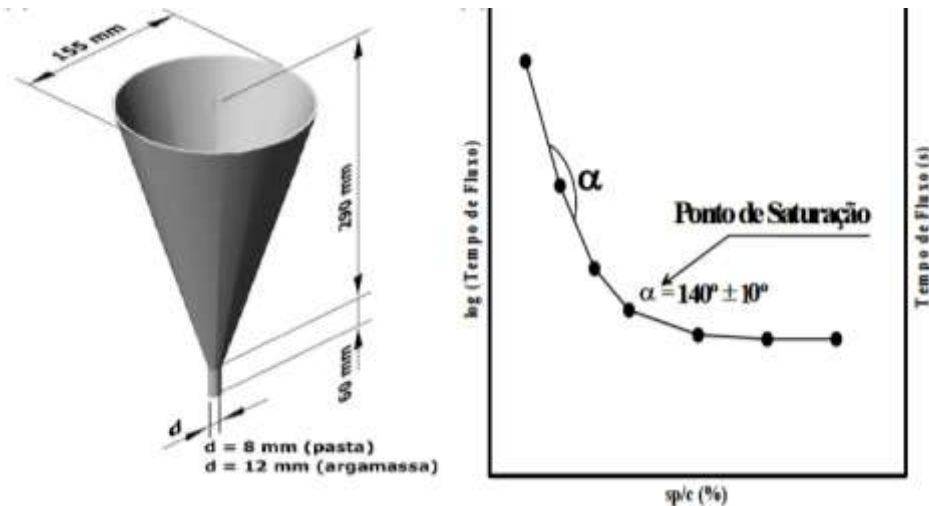


Figura 10. Cone de Marsh e gráfico do ponto de Saturação (Cavalcanti, 2006).

O tempo de fluxo manifesta-se como um parâmetro inverso da fluidez da pasta. Ao variar a relação superplastificante/cimento objetiva-se uma curva $\log T$ versus sp/c , semelhante aos demonstrado na Figura 10. Sendo fixadas as quantidades de cimento, água e fíler, a variável é a quantidade de superplastificante. O gráfico $\log T$ versus sp/c é utilizado para a definição do ponto de saturação de superplastificante, ou seja, encontra-se a percentagem ótima de aditivo para a pasta utilizada.

O ponto de saturação significa a relação sp/c para a qual um incremento da dosagem de superplastificante não provoca nenhuma melhora significativa na fluidez da pasta. E é determinado como sendo a relação de sp/c , correspondente a um ângulo interno de $140^\circ \pm 10^\circ$ na curva $\log T$ versus sp/c .

A dosagem ótima de fíler é obtida através de ensaios de espalhamento, de acordo com o ilustrado na Figura 11. O equipamento utilizado foi o proposto por Kantro, 1980, que consiste de um molde em forma de tronco de cone. O intuito do ensaio consiste na medição do tempo para ser alcançado um espalhamento de 115mm.

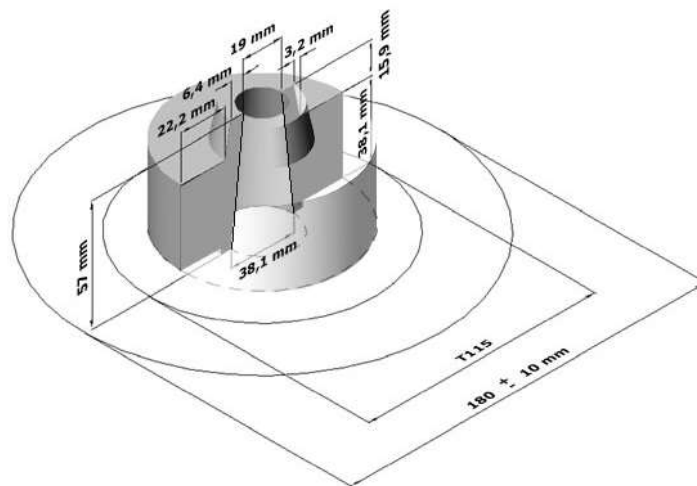


Figura 11. Cone de Kantro (Cavalcanti, 2006).

Nessa fase utiliza-se apenas o teor de saturação previamente encontrado, variando as relações de fíler/cimento. Segundo Gomes e Barros (2009), a melhor relação f/c da pasta, é aquela que apresenta um diâmetro de extensão final de 180 ± 10 mm e um tempo T115 no intervalo de 2 a 3,5 s.

Os ensaios das pastas com o cone de Marsh e o mini-slump permitem obter as respectivas relações de sp/c e f/c, buscando a produção de um concreto que apresente fluidez máxima, sem segregação e com elevada coesão interna.

A otimização do esqueleto granular segue as diretrizes da norma ASTM C29/C29M (2009). Na composição do esqueleto granular as recomendações são para que os valores máximos dos agregados sejam de até 20mm. A máxima densidade no estado seco deve ser o critério a fim de determinar a melhor relação ar/br (areia/brita), onde sem o uso de compactação deve-se descobrir a relação que proporcione a menor quantidade de vazios na junção dos dois agregados. Utiliza-se um recipiente com volume conhecido, no qual iniciamos com uma composição de um dos agregados na relação (100%|0%) e adicionando o segundo até que se tenha a relação inversa (0%|100%), normalmente, variando os teores de 10 em 10% (MOLIN FILHO, 2012).

Com a determinação das relações ótimas de superplastificante/cimento e fíler/cimento na pasta, e determinado a melhor relação areia/brita, baseado no princípio do menor volume de vazio, o procedimento seguinte é a determinação do volume de pasta ideal para satisfazer as condições de resistência e autoadensamento exigidos pelo concreto.

Com os parâmetros pré-estabelecidos e em função de cada tipo de aplicação, são produzidos concretos com teores diferentes de pasta. A escolha do teor ideal de pasta busca o preenchimento dos vazios do esqueleto granular, almejando a autoadensabilidade no

estado fresco e a resistência à compressão no estado endurecido. Desta forma, os concretos devem ser submetidos aos ensaios no estado fresco, de forma a atender os parâmetros da autoadensabilidade.

Na tabela 8 estão apresentadas algumas proporções de misturas de CAA, com níveis de resistência à compressão usual e de alta resistência, e que servirão como base do cálculo de dosagem.

Tabela 8. Faixa de valores para proporções de misturas de CAA (Adaptado de Lisboa, 2004).

Proporções da mistura de CAA (1 m³)	CAA	CADAR
Volume de pasta (%)	35 – 40	38 – 45
Massa de finos (kg/m ³)	400 – 650	605 – 735
Cimento (kg/m ³)	200 – 400	430 – 480
Massa de água (kg/m ³)	150 – 180	170 – 185
Rel. água/finos (massa)	0,25 – 0,40	0,25 – 0,29
Rel. água/(finos+ag.miúdo) (massa)	0,12 – 0,14	0,11 – 0,14
Volume de agregado graúdo (%)	30 – 35	26 – 31
Rel. agregado graúdo/concreto (massa)-(%)	32 – 40	29 – 35
Massa de agregado graúdo (kg/m ³)	750 – 920	695 – 835
Rel. agregado graúdo/agregados (volume)	0,44 – 0,64	0,47 – 0,50
Tamanho do agregado graúdo (mm)	10 – 20	12
Rel. agregado miúdo/argamassa (volume)-(%)	40 – 50	39 – 45
Massa de agregado miúdo (kg/m ³)	710 – 900	740 – 790

Através de uma análise comparativa entre CAA de resistência convencional e CAA de alta resistência, através dos parâmetros apresentados na tabela 8, observa-se que o CAA de alta resistência apresenta um maior volume de pasta, menor relação água/finos e conseqüentemente menor massa de agregados, que são características usuais também no concreto convencional, para o alcance de alta resistência.

Para o estabelecimento dos parâmetros da capacidade de preenchimento são utilizados os ensaios normatizados pela NBR 15823 (2017), Espalhamento (cone de Abrams) e Funil V, e aos parâmetros da capacidade passante utiliza-se a Caixa L, por fim como análise da segregação, mede-se através do ensaio do Tubo em U, ou a coluna de segregação. Na tabela 9 abaixo são demonstrados os parâmetros estabelecidos para a aceitação em quesitos de autoadensabilidade.

Tabela 9. Faixa dos parâmetros de autoadensibilidade.

Propriedades	Ensaio	Parâmetros	Faixa ideal
Capacidade de Preenchimento	Slump-flow	Extensão final do fluxo	600 a 800 mm
		T50	5 ± 2 s.
	Funil V	Tempo total de fluxo	10 ± 3 s
Capacidade de Passagem	Caixa L	TL20	1 ± 0,5 s
		TL40	1,5. a 3s
		H2 / H1	0,8 a 1,0
Estabilidade	Tubo em U	Relação de Segregação	90
	Coluna de Segregação	MB/MT	0 – 15%

Fonte: Adaptado de Gomes e Barros (2009)

Tutikian (2004), comentando a respeito do método supracitado, indica que a divisão do método em duas partes, anteriormente citada como vantagem, também pode ser considerada uma desvantagem, haja vista que o concreto é uma mistura entre diversos materiais trabalhando em conjunto, assim, segundo o autor, torna-se perigoso quantificar um a um, não considerando a interação entre eles.

No entanto, o estudo da reologia da pasta e o acréscimo de uma fase intermediária, denominada de estudo da argamassa, resultam em conhecimentos importantes quanto ao comportamento do material, ainda mais quando são levadas em consideração as características dos agregados reciclados (como a elevada absorção, e porosidade) que alteram a reologia do CAA produzido.

2.5. Propriedades do concreto autoadensável com ARC

O uso de agregados reciclados para a produção de novos concretos parece ser uma solução com um grande potencial a ser explorado. Inicialmente permite resolver os problemas relacionados ao armazenamento; transporte e despejo de resíduos de construção e demolição. Além de contribuir para um ambiente potencialmente mais sustentável, com aumento de valor de mercado desses resíduos, conseqüentemente pode-se reduzir o consumo de agregados naturais.

Segundo Grdic et al. (2010) para uma comparação equilibrada entre agregados reciclados de concreto e agregados naturais, a distribuição de tamanho dos agregados deve ser a mesma em ambas as misturas. Para Evangelista e Brito (2014) a distribuição granulométrica é um dos fatores que mais influenciam as principais características do concreto, juntamente com a trabalhabilidade, a resistência mecânica e, no caso do concreto com agregados reciclados, a absorção de água.

O ajuste da água é uma questão extremamente importante quando se considera o uso de agregados reciclados, pois os mesmos, como supracitado são constituídos pelo AN original cercado por uma camada de argamassa que geralmente apresenta uma elevada porosidade. Essa característica influencia de forma significativa a absorção de água dos agregados reciclados.

Para estimar adequadamente a relação água/cimento efetiva, é necessário conhecer o valor de absorção de água do agregado reciclado e sua variação ao longo do tempo. Assim, é possível garantir a mesma trabalhabilidade e uma qualidade uniforme do novo concreto. No entanto, Matias et al. (2013) observaram uma tendência de trabalhabilidade descendente, concluindo que foi necessário o uso de quantidades maiores de superplastificantes com o aumento da taxa de incorporação de agregados reciclados, sugerindo que as misturas perdem eficiência em função dessa incorporação.

No entanto, as propriedades do CAA no estado fresco e endurecido, podem ser controladas desde que um estudo de dosagem adequado seja realizado prioritariamente. A seguir algumas propriedades do CAA com agregados reciclados de concreto foram analisadas de forma a auxiliar a realização desta pesquisa.

2.5.1. Propriedades no estado fresco

Nas pesquisas consultadas, observou-se que o ensaio de espalhamento (que avalia a fluidez e a velocidade de fluxo na ausência de obstruções), o ensaio do funil-V (que avalia a viscosidade aparente e a capacidade de preenchimento) e o ensaio na caixa-L avaliando a habilidade passante, são os parâmetros mais utilizados para avaliação do CAA no estado fresco.

Na maioria dos estudos consultados, a norma empregada para o ensaio de espalhamento foi a EN 12350-8/2009, sendo correspondente à norma brasileira NBR

15823-2 (2017). E o que pode ser observado como consenso, foi que a incorporação de agregados graúdos reciclados de concreto diminui o espalhamento e aumentam o T50.

Corinaldesi et al. (2004) utilizaram em seu estudo 100% de agregado graúdo reciclado de concreto (massa específica de 2,32 g/cm³, D_{max} de 15 mm e absorção de água de 8%) e 100% de agregado miúdo reciclado de concreto (massa específica de 2,15 g/cm³, D_{max} de 6 mm e absorção de água de 10%), além da adição de diferentes tipos de materiais (Cinza volante, Sílica ativa, fíler) com um teor de 15% na massa de cimento.

As constatações dos autores foram de que o CAA produzido com sílica apresentou o menor espalhamento. No entanto, em relação ao tempo total de fluxo, ou seja, o período de tempo desde que o Abrams é levantado até o material atingir seu espalhamento final, é maior com a adição de fíler.

Kou e Poon (2009) estudaram CAA com incorporação de AMRC e AGRC. Os autores produziram três famílias com 100% de AGRC e vários teores de substituição de AMN por AMRC. Os autores descobriram que o espalhamento aumentava à medida que a taxa de incorporação de FRA crescia. No entanto isso foi atribuído à água adicionada para compensação da absorção do resíduo. Após 10 minutos, o FRA absorveu apenas 55% da sua capacidade de água às 24 horas. Assim, a água adicional pode não ter sido totalmente absorvida pelo AMRC nos primeiros minutos da mistura e, portanto, esse excesso de água contribuiu para um aumento do fluxo de queda.

Pereira-de-Oliveira et al. (2014) descobriram que para o espalhamento aumentar com a taxa de incorporação de AGRC, foi necessário um aumento gradual do teor de Superplastificante, mantendo simultaneamente a faixa de espalhamento estabelecida pelos autores.

Safiuddin et al. (2011), constataram que o tempo de fluxo diminui com os teores de AGRC de 30% e 40% e aumenta para substituições de 70% e 100%, conforme Figura 12. As razões para essas duas tendências opostas são as mesmas que para a redução do espalhamento. O reduzido teor de agregados graúdos (30% e 40%) e a maior rugosidade e angulosidade do AGRC aumentam o atrito entre os agregados, contribuindo para o aumento do tempo de escoamento.

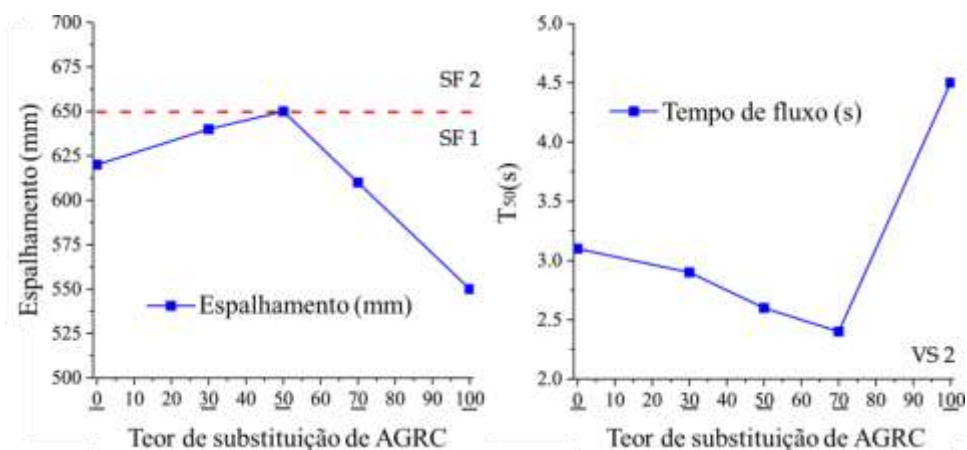


Figura 12. Redução do Espalhamento e do tempo de fluxo (SAFIUDDIN et al., 2011)

O ensaio para avaliar a viscosidade e capacidade de preenchimento para a maioria dos estudos foi o funil-V, realizado de acordo com a EN 12350-9 (2009). Foi verificado que o tempo de fluxo no funil-V aumenta com a incorporação de agregados reciclados, principalmente relacionado à maior absorção de água do AR em relação ao AN.

Corinaldesi et al. (2004) descobriram que o concreto autoadensável com AGRC e cinzas volante (sem AMN ou AMRC; $t=13s$) teve maior tempo de fluxo do funil V do que o traço com AMRC e AGRC ($t = 6 s$). Tuyan et al. (2014) também constataram que o tempo de fluxo do CAA aumentou com a taxa de incorporação de AGRC. Este fenômeno foi explicado pela superfície mais áspera em relação ao AGN e ao menor conteúdo de superplastificante usado.

Os valores de espalhamento e do tempo de fluxo através do funil-V estão fortemente correlacionados. Safiuddin et al. (2011) obtiveram um coeficiente de correlação de 0,9765, para uma relação linear e Tuyan et al. (2014) um de 0,9734, para uma relação de 2º grau. Isso significa que ambos os parâmetros são influenciados de forma semelhante pela incorporação de AGRC.

O ensaio da caixa-L, nas pesquisas consultadas, foi realizado de acordo com a EN 12350-10 (2009). Observou-se que, de maneira geral, a habilidade passante diminui à medida que a proporção de substituição de AGRC aumenta (ao se manter constante a relação a/c e o teor de superplastificante). A principal causa atribuída a este efeito foi a maior absorção de água do AGRC em relação ao AGN.

Todas as misturas testadas por Kou e Poon (2009), mostraram uma boa habilidade passante, ou seja, os valores de H2/H1 sempre excederam o valor de 0,80. Inicialmente os autores observaram um aumento desse índice com a taxa de incorporação de AMRC, devido à menor absorção de água do agregado reciclado no início da mistura. No entanto,

os grãos de agregado reciclado não absorveram a sua capacidade plena e a água livre resultante contribuiu para um aumento da habilidade passante.

Grđic et al. (2010) , registraram uma boa capacidade de passagem, com valores de 0,94 a 0,98, e que aumentaram com a incorporação de AGRC, essa tendência sendo explicada pelo aumento da relação a/c.

2.5.2. Propriedades de estado endurecido

Através dos resultados de várias pesquisas, a densidade aparente diminui à medida que o teor de agregados reciclados aumenta, dada a menor densidade aparente dos AR em relação aos agregados naturais. Pereira-de-Oliveira et al. (2014), por exemplo, constataram que a densidade aparente diminui 1% em traços com teores de substituição de 20% e 40%, e 30%, e reduz 3% utilizando 100% de AGRC. Esta tendência ocorre porque o AGRC tem uma densidade menor do que o AGN.

Abed et al. (2018), observaram que a densidade diminuiu com o aumento da quantidade de AGRC ou agregado graúdo multi-reciclado de concreto. A argamassa anexada aumentou a cada geração de reciclagem (RA25R e RA50R), o que reduziu a densidade do CAA produzido conforme mostrado na Figura 13. Segundo os autores, esse comportamento confirmou resultados encontrados por outros estudos.

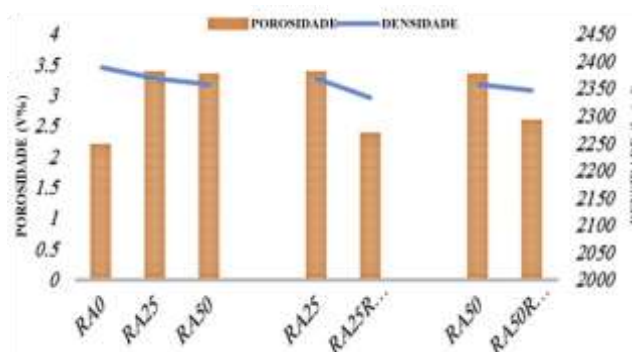


Figura 13. Densidade e porosidade de CAA aos 90 dias (ABED et al.,2018).

A incorporação de AR no concreto é responsável por uma perda de desempenho em termos de resistência à compressão, devido ao aumento na relação a/c, causada pela alta absorção do AR e sua forma plana e angular. Corinaldesi et al. (2004) observou que a resistência à compressão do CAA, onde AR e cinzas (da incineração de resíduos sólidos urbanos) foram usados, apresentaram valores reduzidos. Os autores concluíram que o uso

deste tipo de cinzas não contribui para um aumento na resistência à compressão, e nenhuma atividade pozolânica discernível foi detectada.

Em contrapartida, os estudos de Kou e Poon (2009) mostraram que, a resistência à compressão diminui com o teor de substituição. Com exceção do resultado anômalo de 100% os 28 dias, que mostra uma leve diminuição. Esse desempenho parece se tornar mais clara com a idade, o que pode ser devido à ativação, em estágio inicial, do cimento não hidratado nos agregados reciclados, efeito que se desvanece ao longo do tempo. Os resultados da resistência à compressão encontrados pelos autores estão expressos na Figura 14.

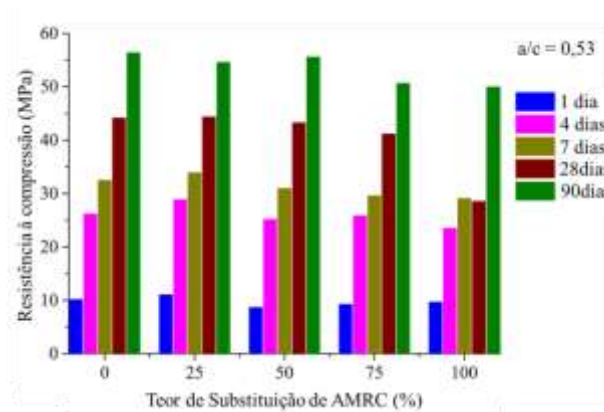


Figura 14. Resistência à compressão aos 1, 4, 7, 28 e 90 dias, em cubos (KOU e POON, 2009)

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentado a caracterização de todos os materiais utilizados nessa pesquisa, bem como os métodos de ensaios utilizados no estudo da pasta, da argamassa, da composição do esqueleto granular, da caracterização das propriedades do CAA no estado fresco, cujos procedimentos e métodos de ensaios foram baseados na NBR 15823-1 (2017). Além dos ensaios usados para obtenção das propriedades mecânicas no estado endurecido.

3.1. Aspectos gerais

A metodologia aplicada na pesquisa segue os preceitos apresentados por Cavalcanti (2006), o qual se baseou em trabalhos de Gomes (2002) e Lisbôa (2004). Para a aplicação deste método, além do estudo da pasta que faz parte do método de dosagem proposto por Gomes et al., (2003), também estudou-se a argamassa com e sem AMRC, buscando as características necessárias para o CAA.

O programa experimental foi dividido em seis fases, conforme mostra a Figura 15. Desta maneira tem-se a seguinte descrição do programa experimental do presente estudo:

Fase 1: Seleção dos materiais e caracterização dos mesmos. Nesta etapa, o resíduo de concreto foi selecionado e posteriormente triturado, foi identificado o tipo de cimento que estaria à disposição localmente, e os agregados naturais (miúdo e graúdo) e a adição mineral foram selecionados.

Fase 2: Ensaios na pasta para a determinação do ponto de saturação do aditivo, através do cone de Marsh, e o estudo melhor relação sílica/cimento, utilizando o cone de Kantro (1980).

Fase 3: Estudo complementar da argamassa se deu através de uma dosagem o qual utiliza como parâmetros as pesquisas de Cavalcanti (2006) e Lisbôa (2004). Essa adaptação se fez necessária buscando a viabilização do uso do agregado miúdo reciclado de concreto na posterior dosagem do CAA.

Fase 4: Determinação do esqueleto granular, seguindo a metodologia proposta por Gomes et al. (2003). Nessa etapa busca-se a relação agregado miúdo/agregado graúdo que resulta na maior massa unitária em estado solto.

Fase 5: Dosagem e Produção do CAA realizando substituições parciais de agregado natural por agregado reciclado de concreto conforme uma adaptação do Método de Gomes et al. (2003), verificando suas propriedades de autoadensabilidade e moldando os corpos de prova para a realização dos ensaios mecânicos.

Fase 6: Análise e discussão dos resultados. Nessa etapa será realizada uma análise de todos os resultados coletados e sua subsequente discussão, buscando a compreensão do efeito do agregado miúdo reciclado de concreto nas propriedades do concreto autoadensável.

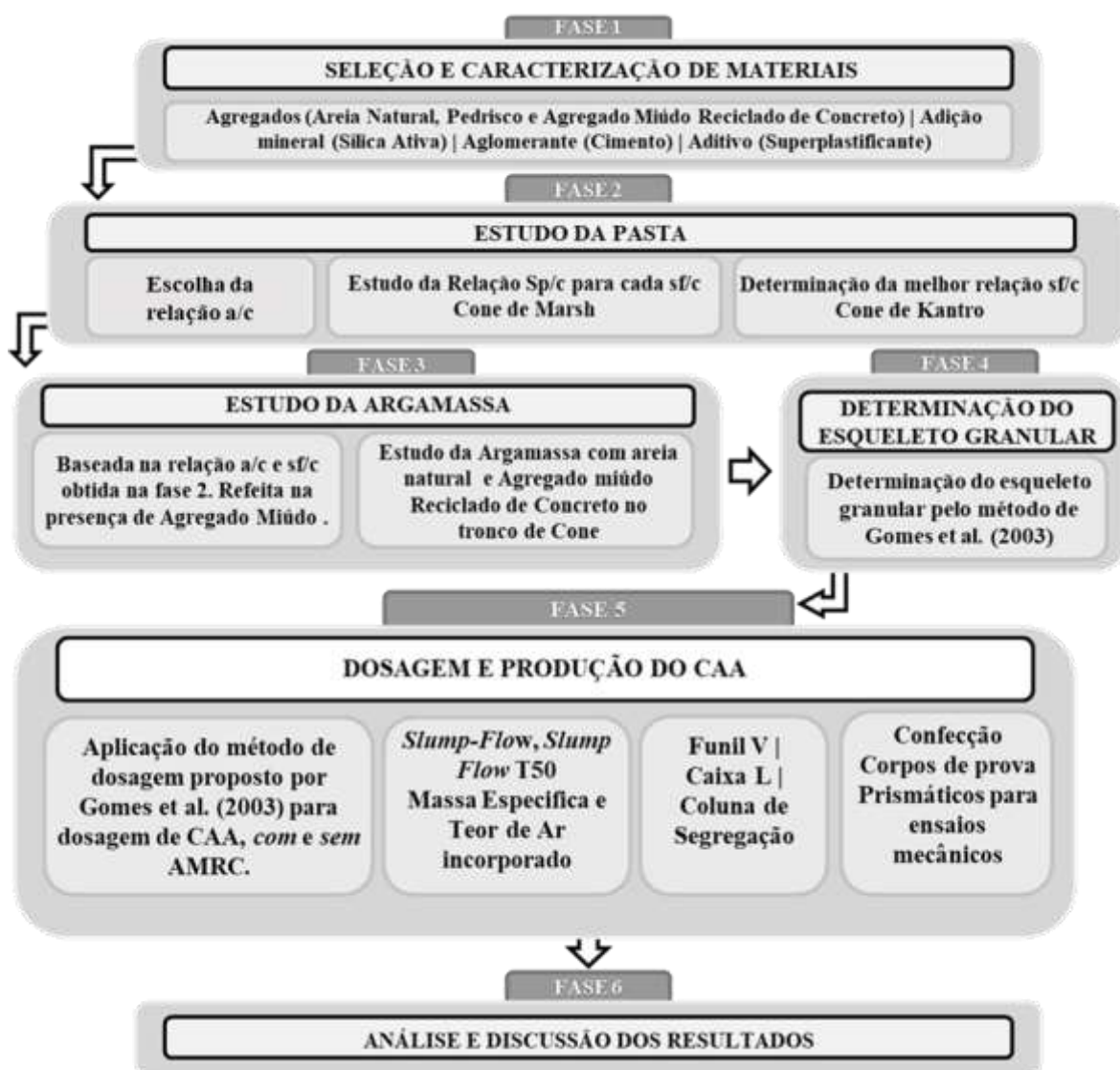


Figura 15. Fluxograma da metodologia.

O programa experimental da pesquisa foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia Civil – LEC do Campus Universitário de Tucuruí – CAMTUC/ UFPA, com exceção da caracterização química do cimento realizado no LACER (Laboratório de Materiais Cerâmicos), localizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

3.2. Fase 1: Seleção e caracterização dos materiais

Conforme o método de Gomes et al. (2003), a seleção dos componentes do concreto se baseia nas propriedades desejadas, levando em consideração a disponibilidade de materiais no mercado local, mantendo assim a competitividade do concreto em termos de custo.

Nesta fase serão apresentados os materiais utilizados nesta pesquisa bem como a metodologia e ensaios utilizados em sua caracterização.

3.2.1. Cimento

O cimento adotado na realização desta pesquisa foi o cimento Portland Composto com Escória, CP II - E - 32, produzido na cidade de Barcarena (PA), de acordo com a NBR 16697 (2018), cuja resistência é de 32 MPa. Neste processo, obedeceu-se o critério em adotar o mesmo cimento, homogêneo e proveniente do mesmo lote para a produção dos concretos. O ensaio de caracterização química e granulometria à Laser foram realizados no LACER (Laboratório de Materiais Cerâmicos), na UFRGS.

As características físicas do cimento empregado estão apresentadas na Tabela 10, relacionando-os conforme as exigências da NBR 16697 (2018).

Tabela 10. Características físico-químicas do CP II – E

Tipo de material		Cimento CP II - E	Limites Norma NBR 16697/18
Propriedades determinadas		Valores	
Granulometria a Laser - Diâmetro médio (μm)*		23,17	
Massa Específica (g/cm^3)*		3,03	---
Finura	Retido na #200(%)	0,5	$\leq 12,0$
Tempo de Pega	Início (h:min)	03:11	$\geq 1:00$
	Fim (h:min)	04:40	$\leq 12:00$
Perda ao Fogo		5,7	$\leq 8,5$
Área específica Blaine (cm^2/g)		4197	≥ 2600
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	20	$\geq 10,0$
	7 dias	26,4	$\geq 20,0$
	28 dias	36,3	$\geq 32,0$

* Resultados através de ensaios realizados pelo autor.

Fonte: Fabricante

Conforme apresentado na tabela 10, todos os resultados se encontram em concordância com o estipulado pela norma, o que serve para atestar a qualidade do material empregado. Os resultados da massa específica e do diâmetro médio foram encontrados mediante ensaios realizados pelo autor. O valor da massa específica encontrada se mostrou em concordância com o apresentado pelo fabricante.

Tabela 11. Composição química do CP II – E

Tipo de material		Cimento CP II - E	Limites Norma NBR 16697/18
Propriedades determinadas		Valores	
Componentes Químicos (%)	Al ₂ O ₃	5,455	-
	SiO	1,605	-
	Fe ₂ O ₃	4,369	-
	CaO	71,567	-
	MgO	10,229	-
	SO ₃	4,451	≤ 4,5
	Na ₂ O	0,040	-
	K ₂ O	0,058	-
	SrO	0,029	-
	MnO	0,056	-
	TiO ₂	0,037	-

Como já explicitado no capítulo de revisão o cimento Portland composto, CP II, a composição deve se encontrar dentro do especificado pela EFNARC, em relação ao teor de C₃A (inferior a 10%), e baseado nas equações de Bogue o teor de C₃A do cimento utilizado foi de 7,05%, enquadrando-se nesse parâmetro.

3.2.2. Adição Mineral – Sílica ativa

A adição escolhida para compor este estudo foi a sílica ativa do tipo não-densificada, segundo classificação da NBR 13956 (2012) a sílica é um subproduto gerado do processo de fabricação do silício metálico.

A composição química da amostra coletada foi realizada através do método de espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) e análise por fluorescência de raios-X. Quanto à massa específica, empregou-se o picnômetro de hélio para obtenção deste parâmetro. Os ensaios de caracterização da sílica ativa foram realizados pelo laboratório do fabricante e seus dados fornecidos pela empresa.

A sílica obteve massa específica correspondente a 2,26 g/cm³. Quanto à distribuição granulométrica, observada na Figura 16, obtido através da técnica de granulometria a laser demonstra a distribuição dos tamanhos de partículas na amostra de sílica variando entre 0,4 e 724 µm.

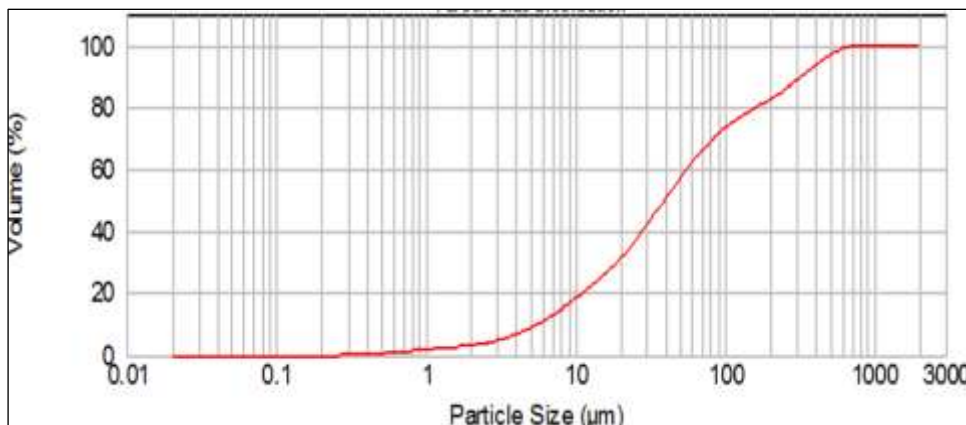


Figura 16. Distribuição do tamanho de partículas da amostra de sílica ativa.

Fonte: Fabricante

Referente à caracterização química, os resultados obtidos estão demonstrados na tabela 12.

Tabela 12. Composição química da sílica ativa.

Composição Química	Resultados (%)
Dióxido de silício (SiO ₂)	95,75
Óxido de enxofre (SO ₃)	1,72
Óxido de fósforo (P ₂ O ₅)	0,89
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,73
Óxido de cálcio (CaO)	0,72
Óxido de zinco (ZnO)	0,06
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	0,05
Óxido de sódio (MnO)	0,02

Fonte: Fabricante.

Diante do demonstrado na tabela 12, o composto do dióxido de silício (SiO₂) é o componente majoritário, com teores de 95,75%, outros óxidos também estão presentes, contudo em quantidades inferiores. A predominância da sílica, aspecto característico de materiais pozolânicos, é o fator determinante da reatividade pozolânica, portanto sua percentagem elevada era esperada.

3.2.3. Aditivo Superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado foi de terceira geração, que apresenta uma cadeia de éter policarboxílico modificado, proporcionando superplastificação e alta redução de água, tornando o concreto com melhores características de trabalhabilidade sem alteração do tempo de pega. Este aditivo é geralmente utilizado para concretos de alto desempenho, onde se requer baixo fator água/cimento assim como durabilidade. A tabela 13 apresenta os dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 13. Propriedades do Superplastificante utilizado

Propriedade	SPC
Base Química	Policarboxilatos
Densidade (g/cm ³)	1,067 – 1,107
Teor de sólido (%)	28,5 – 31,5
Aspecto	Líquido viscoso
Cor	Marrom
Viscosidade (cps)	95 a 160
PH	5 a 7

Fonte: Fabricante

3.2.4. Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado na pesquisa foi a Brita, que apresenta como diâmetro máximo 9,5mm, e são oriundos de rochas do grupo dos metassedimentos. A escolha do agregado graúdo atendeu às referências que indicam o uso de menores diâmetros máximos característicos (máximo de 20 mm segundo o citado anteriormente no capítulo 2) para a produção de CAA.

Semelhante ao procedimento adotado para o agregado miúdo foi seguidas as normas NBR NM 26 (2001) e NBR NM 27 (2001), para seleção das amostras utilizadas na pesquisa, seguido da disposição do material em tambores.

As características físicas da brita foram determinadas através dos ensaios de massa específica e absorção (NBR NM 53, 2003) e massa unitária em estado solto (NM 45, 2002). O ensaio de granulometria foi realizado segundo a NBR NM 248 (2003).

Os resultados da caracterização do agregado graúdo constam na tabela 14.

Tabela 14. Composição granulométrica do Agregado Graúdo.

PENEIRA		MASSA RETIDA (g.)				RETIDA (%)			PASSANTE
		Nº AMOSTRA			MÉDIA	RETIDA			
n.º	(mm)	BR-01	BR-02	BR-03		INDIVIDUAL	ACUMULADA		
1/2"	12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	100	
3/8"	9,5	13,1	13,7	12,5	13,1	1	1	99	
4	4,76	525,5	507,2	543,8	525,5	26	27	73	
8	2,38	713,2	720,7	709,6	714,5	36	63	37	
16	1,19	359,1	374,9	343,4	359,1	18	81	19	
30	0,60	170,0	176,3	163,7	170,0	8	89	11	
50	0,30	115,5	109,7	121,9	115,7	6	95	5	
100	0,15	55,7	51,7	60,0	55,8	3	98	2	
Fundo	-	48,3	48,0	48,6	48,3	2	100	0	
Total		2000	2000	2000	2.000	100,0			
Módulo de finura		4,52							
Diâmetro Máximo		9,5							
Absorção (%)		1,15							
Massa Específica (g/cm³)		2,68							
Massa Unitária (g/cm³)		1,76							

De acordo com a tabela 14, o diâmetro máximo característico foi de 9,5mm, o que segundo Melo (2005) torna-se interessante, pois analisando a fluidez, a deformabilidade e a resistência à segregação que o CAA deve apresentar, agregados graúdos devem possuir distribuição granulométrica bem graduada, e menor dimensão do que o agregado utilizado no concreto convencional.

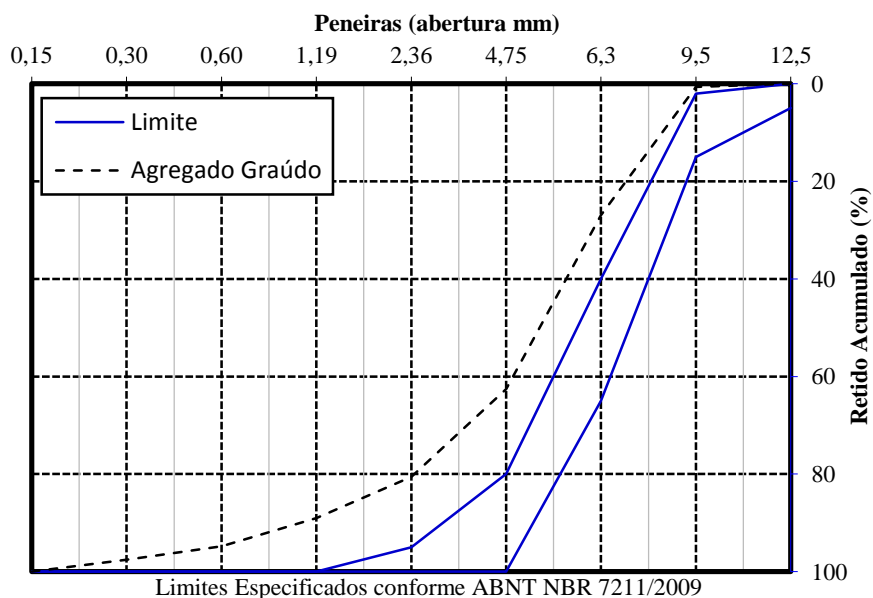


Figura 17. Composição granulométrica do agregado graúdo

De acordo com a Figura 17 o agregado graúdo não se enquadra nas faixas estabelecidas pelas normas brasileiras para agregados entre 4,8mm e 9,5 mm, ficando fora

dos limites que constam na NBR 7211 (2009). No entanto, a curva granulométrica demonstra uma distribuição contínua, o que é considerado um fator positivo ao reduzir os espaços vazios entre os grãos.

O índice de forma do agregado graúdo foi de 3,06, esse valor encontra-se próximo ao parâmetro estabelecido pela NBR 7211 (2009) de 3. Portanto, considerando todos os resultados encontrados o agregado graúdo utilizado nesta pesquisa apresentou caracterização dentro do considerado ideal para a produção de CAA.

3.2.5. Agregado Miúdo Natural

Como agregado miúdo natural (AMN), foi selecionada a areia de origem quartzosa extraída do leito do rio Tocantins, localizado à sua margem esquerda, a qual foi utilizada na construção da segunda etapa da UHE Tucuruí, mantida no estoque denominado Maracanã. As pilhas de agregado miúdo ficam localizadas nas baias do LEC da UFPA, do Campus de Tucuruí, e as amostras foram limpas, retirando folhas secas, britas das baias adjacentes e outros contaminantes.

As amostras utilizadas nos ensaios de caracterização foram determinadas seguindo a metodologia das normas NBR NM 26 (2001) e NBR NM 27 (2001). As amostras selecionadas para a realização desta pesquisa foram conservadas no interior de tambores.

Os ensaios realizados para a caracterização física do agregado miúdo foram: determinação da massa unitária em estado solto de segundo a NBR NM 45 (2003) e massa específica e absorção, de acordo com a NBR NM 52 (2009).

Foi realizado o ensaio de determinação da composição granulométrica (granulometria, dimensão máxima característica e módulo de finura) conforme NBR NM 248 (2003), e utilizou-se os parâmetros da NBR 7211 (2009) para a caracterização do agregado miúdo segundo os limites da zona ótima e utilizável.

Os resultados da caracterização do agregado miúdo utilizado no estudo, para a verificação da viabilidade da utilização nas dosagens, estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15. Composição granulométrica da areia natural

PENEIRA		MASSA RETIDA (g.)				(%)		
		Nº AMOSTRA			MÉDIA	RETIDA		PASSANTE
n.º	(mm)	AN-01	AN-02	AN-03		INDIVIDUAL	ACUMULADA	
1/2"	12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	100
3/8"	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	100
4	4,76	1,3	0,0	1,3	0,9	0	0	100
8	2,38	3,0	2,8	2,3	2,7	1	1	99
16	1,19	9,0	8,1	10,5	9,2	3	4	96
30	0,60	50,1	50,0	51,2	50,4	17	21	79
50	0,30	190,7	188,8	187,1	188,9	63	84	16
100	0,15	39,4	44,4	42,8	42,2	14	98	2
Fundo	-	6,5	6,3	5,0	5,9	2	100	0
Total		300,0	300,4	300,2	300,2	100,0		
Módulo de finura		2,09						
Diâmetro Máximo		1,19						
Absorção (%)		0,43						
Massa Específica (g/cm³)		2,55						
Massa Unitária (g/cm³)		1,59						

Os resultados da caracterização física da areia de acordo com a tabela 15 revelam que a mesma apresenta diâmetro máximo característico igual a 1,19mm e módulo de finura (MF) correspondente a 2,09. Analisando o módulo de finura da areia natural encontrado, segundo a NBR 7211 (2009), o valor aproximou-se da zona utilizável inferior, o qual varia de 1,55 a 2,20.

Outros autores como, Fernêda (2016) utilizaram uma areia com MF de 2,29, e Señas et al. (2016) uma areia de MF de 2,42. O valor de MF mais baixo da areia utilizada na pesquisa indica que o material apresenta mais finos, o que torna-se interessante na produção de CAA.

A massa específica da areia ficou em um valor aproximado ao adotado nos estudo de Señas et al. (2016), com ME de 2,56 g/cm³, e de Kumar et al. (2017) com ME de 2,6 g/cm³, entre outros. A massa específica da areia servirá como parâmetro para o cálculo da dosagem do CAA, além de servir de fator comparativo com o agregado miúdo reciclado de concreto. A massa unitária da areia apresentou um valor de 1,68 g/cm³, no caso particular do Método de Gomes et al. (2003), esse resultado ajudará na determinação do esqueleto granular.

É possível verificar na Figura 18 que a areia natural utilizada no presente estudo se encontra dentro dos limites da zona utilizável para concretos, conforme classificação da NBR 7211 (2009).

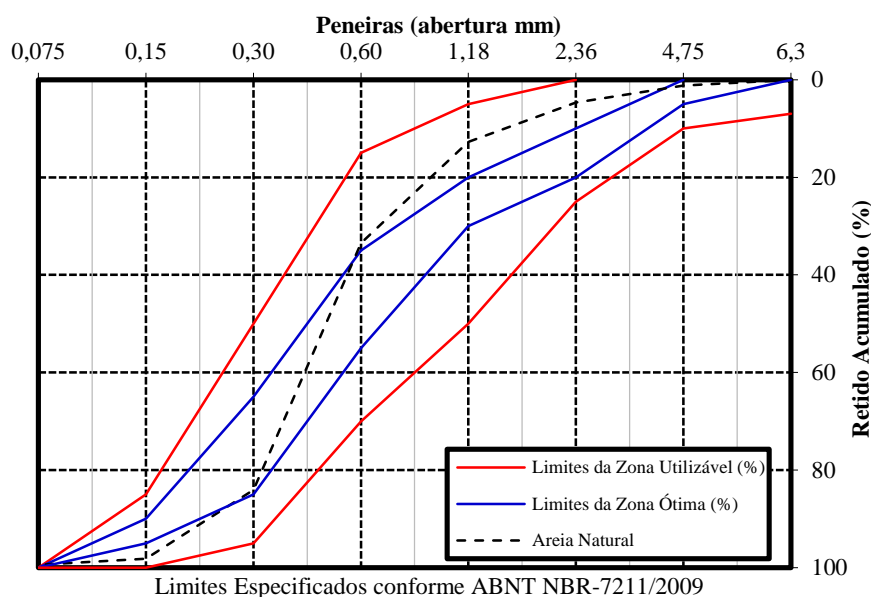


Figura 18. Composição granulométrica da areia natural

Em relação à absorção, o valor encontrado para a areia natural foi de 0,43%. O teor de absorção dos agregados miúdos é um fator relevante, pois durante a dosagem dos materiais é necessário realizar uma compensação do teor de água absorvido. As duas areias utilizadas por Gomes (2002), apresentaram valor bem superior de absorção, de 2,8% e 2,4%.

3.2.6. Agregado Miúdo Reciclado de Concreto

O resíduo de concreto utilizado na pesquisa derivou de corpos de prova ensaiados no laboratório de Engenharia Civil da UFPA, Campus de Belém. O processo de beneficiamento consistiu na britagem do resíduo, realizada em laboratório, utilizando um britador de mandíbulas com alimentação manual, sendo separadas as frações graúdas e miúdas utilizando-se um peneirador mecânico.

Nesta pesquisa, apenas a fração miúda foi utilizada, para tanto utilizou-se uma peneira de malha #4,75 mm de forma a separar as duas frações. O material foi recolhido, ensacado e transportado ao Laboratório de Engenharia Civil da UFPA, do Campus de Tucuruí.

O material foi acondicionado em baldes de 100 litros com tampa em local fresco e arejado, de forma a manter o material livre de contaminantes. As amostras foram separadas de acordo com as normas NBR NM 26 (2001) e NBR NM 27 (2001), após o material ser espalhado sobre lonas, de forma a homogeneizar o resíduo em sua totalidade.

A caracterização física do agregado miúdo reciclado de concreto foi realizada através do ensaio de massa específica NBR NM 52 (2003), massa unitária em estado solto NBR NM 45 (2002) e composição granulométrica (granulometria, dimensão máxima característica e módulo de finura) conforme a NBR NM 248 (2003).

A análise granulométrica, feita segundo a NBR 7211 (2009), tomou como média o valor de três amostras, e os resultados são apresentados na Tabela 16. Segundo os limites granulométricos apresentados nesta norma, o agregado miúdo reciclado utilizado nesta pesquisa pode ser classificado como areia grossa.

Tabela 16. Composição granulométrica do AMRC.

PENEIRA		MASSA RETIDA (g.)				(%)		
		Nº AMOSTRA			MÉDIA	RETIDA		PASSANTE
n.º	(mm)	AMRC-01	AMRC-02	AMRC-03		INDIVIDUAL	ACUMULADA	
1/2"	12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	100
3/8"	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	100
4	4,76	30,7	16,6	26,4	24,5	2	2	98
8	2,38	258,6	244,1	253,5	252,1	25	27	73
16	1,19	196,8	195,2	196,1	196,0	20	47	53
30	0,60	169,9	161,9	169,2	167,0	17	64	36
50	0,30	196,9	209,2	199,6	201,9	20	84	16
100	0,15	97,3	109,5	100,5	102,4	10	94	6
200	0,075	34,8	42,6	38,7	38,7	4	98	2
Fundo	-	14,0	20,7	15,5	16,7	2	100	0
Total		1000	1000	1000	1000	100,0		
Módulo de finura			3,20					
Diâmetro Máximo			4,76					
Massa Específica (g/cm³)			2,47					
Massa Unitária (g/cm³)			1,38					

Em relação ao módulo de finura do agregado reciclado, o mesmo apresentou um valor maior que o da areia natural. Conforme explicitado no capítulo da revisão, a presença elevada de materiais finos presentes nos agregados reciclados pode causar elevada perda de trabalhabilidade e aumento da retração.

Por conseguinte, a caracterização demonstrou que por se tratar de uma areia grossa, a substituição do material natural por AMRC causaria menos efeitos nocivos à reologia do CAA quando correlacionado a um AMRC com excesso de finos.

Comparando com os valores apresentados para a massa específica do agregado reciclado de concreto, utilizado em pesquisas passadas pode-se constatar que o mesmo se enquadra dentro de um intervalo que vai de 2,10 g/cm³ à 2,60 g/cm³ (intervalo baseado nos dados da tabela 1, no capítulo 2). E por meio da Figura 19 pode-se observar que o AMRC

utilizado se encontra dentro dos limites inferior da zona utilizável para concretos, conforme classificação da NBR 7211 (2009).

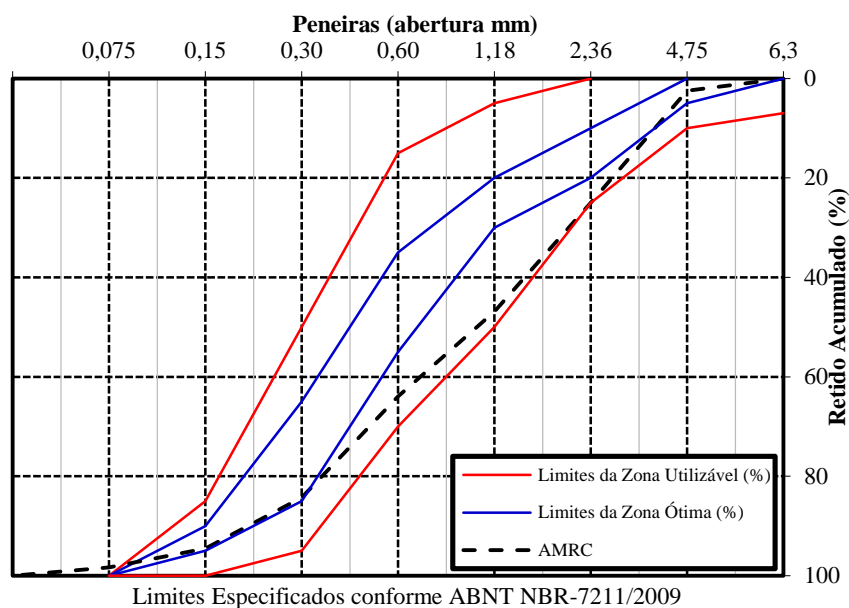


Figura 19. Curva granulométrica do AMRC

A norma NBR NM 30 (2003), utilizada para a determinação da absorção dos agregados miúdos, torna-se uma metodologia deficiente quando utilizada em agregados reciclados miúdos. Por conta de sua elevada taxa de absorção do agregado miúdo reciclado, alta porosidade do material e à possibilidade de perda de material pela grande quantidade de finos apresentada no AMRC.

Diante disso, optou-se pela realização do estudo da absorção do AMRC baseado no método proposto por Leite et al. (2011), o qual utiliza como base, o princípio de Arquimedes, e que apresenta muitas similaridades ao método posteriormente apresentado por Tegguer (2012).

O ensaio de absorção utilizou como equipamentos: uma estufa; recipiente com altura suficiente para garantir a imersão do aparato rígido contendo o material; uma placa de apoio para sustentar a balança; aparato para a imersão da peneira; balança hidrostática com precisão de 0,01g, e um dispositivo para manter a peneira suspensa; espátula metálica; peneira com dimensão de #0,075 mm e papel filtro.

Nas Figuras 20, 21 e 22, podemos observar o aparato de acrílico rígido utilizado para acoplar a peneira, o tanque de imersão e o aparato preso à balança e submerso no tanque durante a realização do ensaio.



Figura 20. Aparato de Acrílico



Figura 21. Tanque para imersão



Figura 22. Aparato preso à balança durante ensaio.

Foram separadas três amostras em bandejas, contendo aproximadamente 1000 g de AMRC cada, e levadas à estufas por 4 horas. Após esse período, foram separadas novamente três amostras contendo 800 g de cada bandeja, e acondicionadas no interior de um recipiente de vidro com tampa na presença de sílica gel, até a temperatura do material estabilizar.

O ensaio tem início com a leitura da M_{seca} do material para, em seguida, montar o equipamento, de forma a retirar a tara da balança considerando o peso do aparato de acrílico. A amostra foi submergida cuidadosamente, de forma que apenas uma lâmina d'água de 1 cm seja formada no interior da peneira, conforme demonstrado na Figura 23.

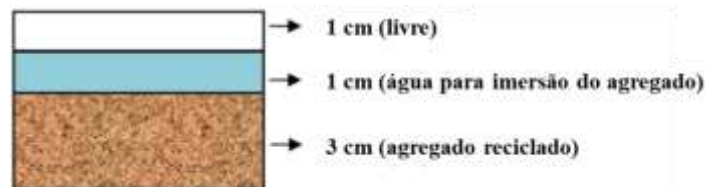


Figura 23. Esquema para disposição dos materiais (LEITE et al. 2011).

As leituras são, então, realizadas de acordo com intervalos pré-determinados por Leite et al. (2011), de 5, 10, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 180, 360 e 1440 minutos, anotando o ganho de massa do conjunto. Segundo os autores, é necessário realizar a cada leitura, uma agitação cuidadosa, com o auxílio de uma espátula, a fim de retirar o ar aprisionado entre as partículas de agregados.

Após a última leitura, o material foi levado à estufa até atingir uma massa constante. A relação entre esse resultado e a M_{seca} não pode ser superior a 0,05%, garantindo que não houve perda de material durante a realização do experimento.

De acordo com Leite et al. (2011) a taxa de absorção do material submerso (%) pode ser encontrada de acordo com a equação abaixo:

$$A_{\text{sub}}(\%) = \frac{(M_{\text{Sub F}} - M_{\text{Sub I}}) * 100}{M_{\text{Sub I}}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: A_{sub} = Taxa de absorção do material submerso, em %;

$M_{\text{sub-F}}$ = Massa do material submerso no instante final, em g;

$M_{\text{sub-I}}$ = Massa do material submerso no instante inicial, em g.

A absorção de água percentual pode ser calculada pela equação 2:

$$A_n(\%) = \frac{A(g)_n * 100}{A(g)_{24h}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde: $A_n(\%)$ = Absorção de água percentual no instante n;

$A(g)_n$ = Massa de água absorvida até o instante n, em gramas;

$A(g)_{24}$ = Massa de água absorvida em 24 horas de ensaio, em gramas.

Depois da realização do procedimento em três amostras, utilizou-se uma média para calcular a absorção do agregado miúdo reciclado de concreto, e foi analisada a velocidade da absorção do material em formato gráfico.

Os resultados do ganho de massa média, absorção percentual e absorção do resíduo, podem ser observados na tabela 17.

Tabela 17. Resultado do ensaio de absorção.

Tempo (hh:mm)	Intervalo para leitura	Ganho de massa (g)	Absorção (%)	Absorção percentual (%)
14:25	0	458,60		0,00%
14:30	5	459,65	1,002	85,82%
14:35	10	460,50	1,004	85,98%
14:40	15	463,98	1,012	86,63%
14:55	30	464,60	1,013	86,74%
15:10	45	465,05	1,014	86,83%
15:25	60	466,70	1,018	87,13%
15:40	75	467,46	1,019	87,28%
15:55	90	468,28	1,021	87,43%
16:10	105	468,89	1,022	87,54%
16:25	120	469,88	1,025	87,73%
17:25	180	471,85	1,029	88,10%
20:25	360	480,82	1,048	89,77%
14:25	1440	535,61	1,168	100,00%

Por meio da equação 1, a taxa de absorção média do AMRC foi de 16,79%, o que apresenta-se como um valor elevado considerando a absorção do AMN de 0,43%. Tal fato já era esperado baseado no capítulo de revisão.

E segundo a curva apresentada na Figura 24, foi constatado que o agregado miúdo reciclado, absorveu mais de 80% da massa total de água dentro dos primeiros 5 minutos. Essa análise é de grande importância para definir as taxativas que servirão de base na compensação da absorção de água do material durante a produção do concreto autoadensável com AMRC.

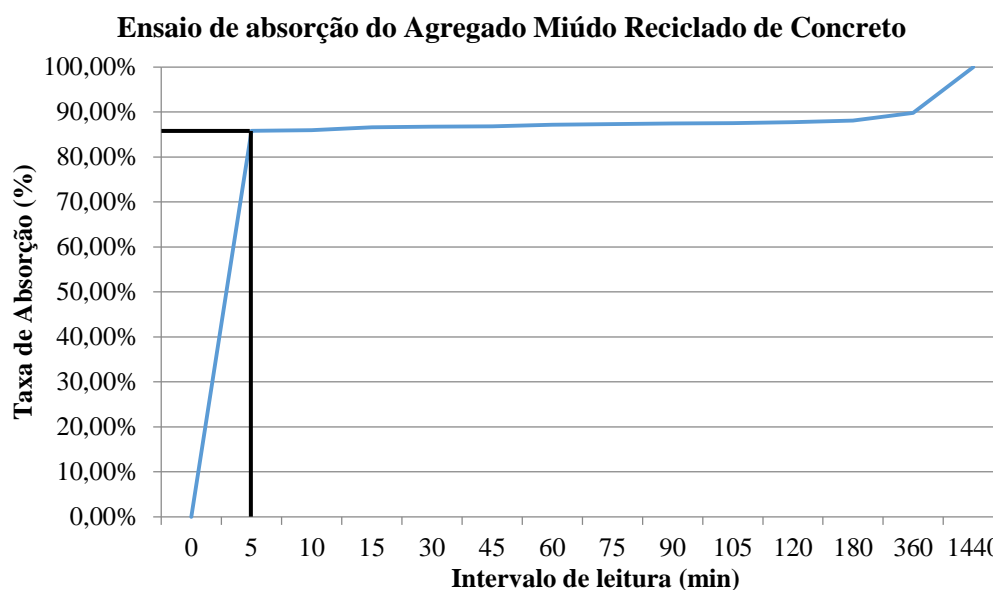


Figura 24. Curva de absorção do AMRC

A método proposto por Leite et al. (2011) demonstrou ser eficiente para avaliar a absorção a longo prazo do material, e de acordo com o comportamento observado na curva de absorção, mostrado na Figura 24, estabeleceu-se que o AMRC seria pré-saturado por 10 minutos antes do início da mistura dos materiais na argamassadeira e na betoneira. E segundo apresentado no capítulo 2, optou-se por não utilizar a compensação total da absorção, encontrando-se uma taxa de compensação adequada durante os estudos na fase 3.

3.2.7. Água

A água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento da Vila Permanente, da cidade de Tucuruí/PA, fornecida pela Eletrobras. Esta água é considerada adequada para o

uso em concretos, pois atende os requisitos de potabilidade prescritos pela NBR 15900-1 (2009).

3.3. Fase 2: Estudo da pasta

Baseada na metodologia apresentada por Gomes et al. (2003), o estudo de dosagem deve objetivar a produção de uma pasta com moderada viscosidade e elevada fluidez, ao considerar que a reologia do CAA depende da interação entre a pasta e o esqueleto granular.

Durante esta fase foi realizado um estudo envolvendo as três relações fundamentais: a relação água/cimento (a/c), a relação superplastificante/cimento (sp/c) e, por fim, a relação sílica fume/cimento (sf/c). O método de Gomes et al. (2003), conforme demonstrado no capítulo 2, ainda prevê a determinação da relação fíler/cimento (f/c), no entanto, durante a formulação do programa experimental optou-se por não utilizar fíler na composição do CAA, devido a presença elevada de finos no AMRC.

Portanto para a determinação, em gramas, da massa de água (P_a), massa de sílica (P_{sf}), massa de superplastificante (P_{spl}) e massa de água contida no superplastificante (P_{asp}) são adotadas as seguintes equações 3,4,5 e 6.

$$P_a = (a/c).C \quad \text{Equação 3}$$

$$P_{sf} = (sf/c).C \quad \text{Equação 4}$$

$$P_{spl} = P_{sp}/(T_{sp}/100) \quad \text{onde } T_{sp}: \text{ Teor de Sólido do Superplastificante} \quad \text{Equação 5}$$

$$P_{asp} = P_{sp}.[(100/T_{sp})-1] \quad \text{Equação 6}$$

A massa de água real adicionada é corrigida subtraindo-se a parcela de água já contida no superplastificante. Portanto para o cálculo da massa de água corrigida é utilizada a equação 7:

$$P_{ac} = P_a - P_{asp} \quad \text{Equação 7}$$

O volume de pasta é definido em função da quantidade, em ml, necessária para o preenchimento do cone de Marsh e mini-slump, ensaios descritos no capítulo 2. A determinação da massa de cimento (C) mínima para a produção da pasta pode ser encontrada substituindo através da equação 8.

$$V_p = \frac{C}{\rho_c} + \frac{P_a}{\rho_a} + \frac{P_{sf}}{\rho_{sf}} + \frac{P_{spl}}{\rho_{spl}} + \frac{P_{asp}}{\rho_a} \quad \text{Equação 8}$$

Onde: **C (g)** = massa de cimento; **P_a (g)** = massa de água; **P_{sf} (g)** = massa da sílica, **P_{spl} (g)** = massa do superplastificante líquido; **P_{asp} (g)** = massa de água contida no superplastificante; **ρ_a (g/ml)** = densidade da água; **ρ_c (g/ml)** = densidade do cimento; **ρ_{sf} (g/ml)** = densidade da sílica ativa; **ρ_{sp} (g/ml)** = densidade do superplastificante líquido; e **V_p (ml)** = volume de pasta.

A produção das pastas foi realizada por meio de uma mistura manual, homogeneizando o cimento e a sílica por cerca de 30 segundos, com o auxílio de uma espátula. Em seguida, foi acrescentado 80% da quantidade de água total, misturando o material por cerca de 120 segundos. Posteriormente foram adicionados os restantes 20% de água com o aditivo diluído, e misturado por cerca de 150 segundos, totalizando 5 minutos.

A primeira etapa desse estudo consistiu em utilizar um mini-slump de acrílico apoiado em uma placa de vidro. Nessa placa foi representado um anel com 115 mm de diâmetro (do centro para a extremidade) para o registro do T₁₁₅ e, uma marcação mais externa representando um diâmetro de 180 mm para orientar o espalhamento final.

O procedimento, demonstrado na Figura 25, consiste em posicionar o mini-slump no centro da placa de vidro e depositar a pasta até o preenchimento completo (Figura 26), depois levantar o cone de forma suave e padronizada (Figura 27), medindo o tempo que a pasta leva para alcançar a marca de 115mm e o seu espalhamento final na placa de vidro.



Figura 25. Cone sob a placa de vidro



Figura 26. Enchimento do cone.



Figura 27. Cone preenchido para ensaio

Inicialmente foram fixados os valores da relação superplastificante/cimento (sp/c) em 1% e da relação sílica fume/cimento (sf/c) em 5%, valores adotados através de experiências iniciais. As pastas eram avaliadas através do espalhamento médio (duas medidas transversais) e do aspecto visual (borda uniforme e ausência de segregação/exsudação). As dosagens adotadas como ponto de partida das faixas experimentais de a/c podem ser observadas na Tabela 18.

Tabela 18. Quantitativo de materiais com a relação a/c como fator variável.

Composição da Pasta						
a/c	sf/c (%)	sp/c (%)	Cimento (g)	Sílica (g)	Aditivo (g)	Água (ml)
1	0,45	5	200	10	2	90
2	0,47					94
3	0,49					98
4	0,51					102
5	0,53					106

O estágio seguinte consistiu em manter a relação a/c fixa (determinada por meio dos resultados da primeira etapa) alterando-se o teor do fino-pozolânico. No caso do estudo foi utilizada a sílica ativa, testando-se intervalos de 5%, calculados sob a massa do cimento. Esse intervalo teve como base os estudos de Cavalcanti (2006) e Lisbôa (2004).

De posse desses resultados, foi realizado o estudo do ponto de saturação do aditivo, através da verificação do tempo de fluxo no cone de Marsh, simultaneamente à análise do espalhamento médio.

Tendo como base os valores obtidos em ambos os ensaios das pastas, no cone de Marsh e no mini-slump, são determinadas as relações a/c, sp/c e sf/c, o qual busca-se produzir uma pasta que apresente elevada fluidez, sem segregação e com alto nível de coesão interna, transferindo essas características ao CAA que será produzido.

No entanto, como demonstrado na revisão da literatura apresentada no capítulo 2, a substituição parcial de agregado miúdo natural por AMRC afeta de forma negativa a fluidez do CAA. Buscando compreender a influência dessa substituição, foi realizado um estudo em argamassas, conforme demonstrado no tópico seguinte.

3.4. Fase 3: Estudo da argamassa

O ponto inicial desta etapa fundamenta-se na experiência obtida no desenvolvimento da pasta na fase 2. Neste estudo, as relações a/c, sf/c e sp/c pré-

estabelecidas são utilizadas para análise da influência do teor de substituição de AMRC em argamassas.

O estudo em argamassas foi a adaptação realizada no método proposto por Gomes et al. (2003), pois de acordo com as literaturas consultadas, a elevada presença de finos e a argamassa aderida aos grãos (que causa um aumento significativo da absorção do agregado reciclado) no AMRC precisa ser estudada de forma a mitigar ou reduzir sua influência no CAA produzido.

Essa etapa objetiva observar a interação da pasta em presença de agregado miúdo (natural e reciclado). Esse procedimento foi demonstrado por Lisbôa (2004) e Cavalcanti (2006).

Para a determinação da argamassa com AMRC foram utilizados teores de substituição fixos em 0%, 10%, 20% e 30%, os mesmos empregados na produção do CAA. A escolha desses teores foi baseada nos resultados satisfatórios encontrados por Evangelista e de Brito (2007), supracitados no capítulo 2. No estudo da argamassa, portanto, mantiveram-se fixos: A relação a/c, o teor de sílica e a metodologia de mistura.

O procedimento de mistura adotado para a produção das argamassas foi o seguinte: O cimento e a sílica eram adicionados com o agregado miúdo (Natural ou com teores de AMRC), deixando a argamassadeira funcionando por 1 minuto, em velocidade lenta. Em seguida, o equipamento era pausado durante 30 segundos para raspagem. Após esse período, adicionou-se 80% da relação a/c misturando por mais 1 minuto, e novamente efetuou-se uma nova raspagem durante 30 segundos. Por último, foi adicionado o superplastificante com o restante da água, abatida da água do superplastificante e da umidade da areia, misturando durante os 2 minutos finais, totalizando 5 minutos.

A primeira avaliação das argamassas foi através do espalhamento no tronco de cone, utilizando um equipamento segundo as dimensões estipuladas pela EFNARC (2002), e conforme ilustrado na Figura 28.

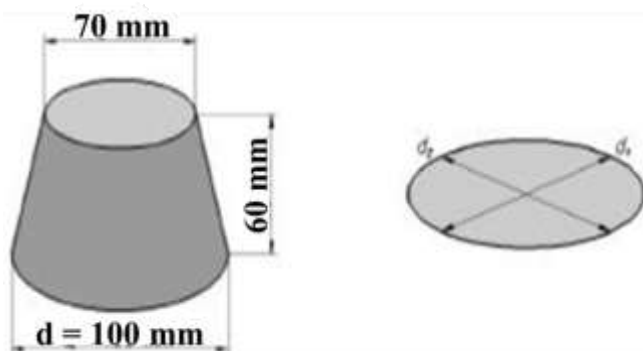


Figura 28. Tronco de cone para espalhamento em argamassas (EFNARC, 2002).

A finalidade desse ensaio é verificar a fluidez da mistura, medindo os diâmetros de espalhamento, e alguns parâmetros estão apresentados na tabela 19, sendo os valores da EFNARC (2002) para argamassas autoadensáveis como base nesta fase. Além do espalhamento médio, também foi avaliado o aspecto visual das misturas, semelhante ao processo realizado na fase 2.

Tabela 19. Parâmetros de espalhamento.

Autores	Espalhamento (mm)
EFNARC (2002)	240 a 260
Edmatsu et al. (1999)	200 a 283
Domone e Jin (1999)	300

O ensaio no Cone de Marsh com as argamassas, semelhante ao estudo da pasta, teve a finalidade de determinar o ponto de saturação do superplastificante, utilizando o tempo de fluxo como parâmetro. O equipamento utilizado seguiu as mesmas dimensões do estipulado por Lisbôa (2004) e Cavalcanti (2006), com abertura inferior de 12 mm.

Segundo os autores, utilizando uma relação areia/cimento (ar/c) = 2, e variando a relação superplastificante/cimento (sp/c), é possível observar o efeito do agregado miúdo (natural e reciclado) na espalhamento e na segregação das argamassas. A composição dos traços com 0% de AMRC pode ser observada na tabela 20.

Tabela 20. Quantitativo de materiais variando a relação sp/c .

Composição da argamassa								
a/c	sf/c (%)	sp/c (%)	Cimento (g)	Areia (g)	Sílica (g)	Aditivo (g)	Água (ml)	
1	0,47	10	1100	2200	110	2,2	515,8	
2						0,2		4,4
3						0,4		6,6
4						0,6		8,8
5						0,8		11

Em relação aos traços utilizando AMRC em sua composição, foram moldadas argamassas testes (utilizando 20% de AMRC) com diferentes taxas de compensação (50%, 60%, 70% e 80%), e baseado nos critérios de perda de trabalhabilidade e aumento da exsudação, adotou-se uma compensação de 70% da taxa de absorção média.

Com base nesse valor adotado, o agregado miúdo reciclado foi colocado no interior da cuba da argamassadeira com a sua taxa de compensação da absorção por um período de 10 minutos, tempo escolhido pelo ganho de massa apresentado na Figura 26.

Nesta etapa, utilizando o ponto de saturação encontrado no traço de 0% de AMRC, foram moldadas argamassas variando apenas o teor de substituição de AMRC. Esse critério foi adotado de forma a quantificar a perda de fluidez causada pela substituição de AMN por AMRC. Os traços utilizados nessa etapa estão apresentados na tabela 21.

Tabela 21. Quantitativo de materiais com a relação sp/c como fator variável.

Composição das argamassas								
a/c	sf/c (%)	sp/c (%)	Cimento (g)	Areia (g)	AMRC (g)	Sílica (g)	Aditivo (g)	Água (ml)
0% AMRC	0,47	10	1100	2200	0	110	6,6	515,8
10% AMRC				1980	220			
20% AMRC				1760	440			
30% AMRC				1540	660			

Com base nos resultados encontrados no estudo da argamassa buscou-se produzir um CAA que minimizasse a perda de fluidez nos teores com substituição de AMRC. No entanto, para a dosagem segundo método de Gomes et al. (2003) é preciso determinar as proporções de agregado miúdo e graúdo utilizando o estudo do esqueleto granular a ser demonstrado na fase 4.

3.5. Fase 4: Determinação do esqueleto granular

O ensaio de determinação do esqueleto granular é utilizado para a determinação da maior massa unitária e do menor índice de vazios considerando as relações entre agregado graúdo/agregado miúdo. Esse procedimento é descrito por Gomes e Barros (2009), supracitado no capítulo de revisão.

Nessa fase, as proporções de agregado iniciam-se na proporção 100%/0% (br/ar) até alcançar a razão 50%/50% (br/ar). Em sequência, inicia-se de 0%/100% de br/ar até alcançar o ponto central 40%/60% (br/ar). A lógica deste método busca utilizar a menor quantidade de areia e brita para realização das 11 faixas experimentais.

Inicialmente, os agregados foram misturados manualmente no interior de uma bombona, partindo de uma massa de 20 kg de agregado graúdo e 0 kg de agregado miúdo, fazendo variar a relação entre elas. Em cada relação, preencheu-se um recipiente de 9,2 litros, sem nenhum tipo de compactação.

O procedimento foi realizado três vezes para cada relação, resultando em três valores de massa unitária. Para cada massa unitária obtida era calculado também o volume de vazios entre os componentes da mistura.

O cálculo da massa unitária para cada relação areia/brita é regido pela equação 9:

$$\omega_u = Pt/Vt \quad \text{Equação 9}$$

Onde: Pt = Massa total da mistura (g) e Vt = volume total do recipiente preenchido (cm³).

Em seguida, adotando ρ_{ar} como a massa específica da areia, ρ_{br} como a massa específica da brita, é possível calcular a densidade absoluta específica da mistura (ρ_{ab}) segundo a equação 10, e o volume de vazios da mistura V(%) através da equação 11.

$$\rho_{ab} = \frac{\rho_{ar} * \%_{areia} + \rho_{br} * \%_{brita}}{100} \quad \text{Equação 10}$$

$$V(\%) = \frac{\rho_{ab} - \omega_u}{\rho_{ab}} * 100 \quad \text{Equação 11}$$

Para cada relação entre areia e brita obtém-se um V(%). Então, obtém-se uma curva, plotada num gráfico V(%) *versus* % de areia, onde o ponto mínimo da mesma corresponde aos percentuais ótimos entre a areia e a brita.

3.6. Fase 5: Dosagem e produção do CAA

O estudo de dosagem do concreto autoadensável produzido na pesquisa baseou-se nas formulações apresentadas por Gomes et al. (2003), considerando as respostas apresentadas no estudo da pasta e do esqueleto granular. No entanto, considerando a particularidade do AMRC (elevada absorção e teor de finos), optou-se por adotar o estudo da argamassa proposto por Lisbôa (2004) e Cavalcanti (2006), com o objetivo de complementar os dados apresentados na pasta.

Utilizando as relações determinadas nas fases 3 e 4 (a/c, sp/c, sf/c, ar/br), para definir a composição do concreto por metro cúbico é necessário estabelecer um volume de pasta, produzindo famílias de CAA com diferentes teores a fim de encontrar a variação que atenda os requisitos exigidos de um concreto autoadensável.

O ponto de partida para a escolha do volume da pasta teve como base os valores apresentados na tabela 8 no capítulo 2, onde indicava que uma proporção entre 35 a 40%

de volume de pasta seria adequada na produção do CAA. À premissa, o percentual escolhido foi de 38%, ou seja, o ponto médio entre os dois valores supracitados, e caso o CAA não atendesse aos requisitos de autoadensabilidade, seriam produzidas famílias de CAA com um volume de pasta de 40%.

No entanto antes de realizar-se o estudo dos traços com e sem AMRC, foi realizada uma etapa intermediária comparando dois procedimentos de mistura. O primeiro procedimento seguiu a metodologia utilizada por Lisbôa (2004) e segue as etapas conforme a Figura 29:

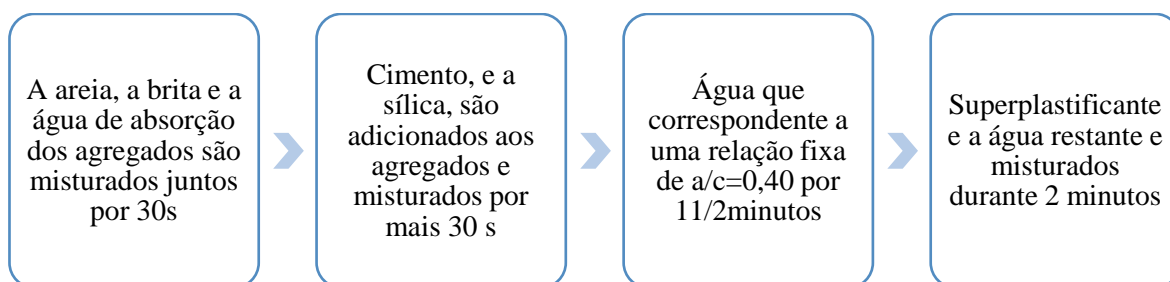


Figura 29. Procedimento de mistura adotado por Lisbôa (2004).

A segunda metodologia adotada foi a mesma utilizada por Singh et al. (2018), durante sua pesquisa com AMRC e AGRC. A Figura 30 ilustra o procedimento de mistura.

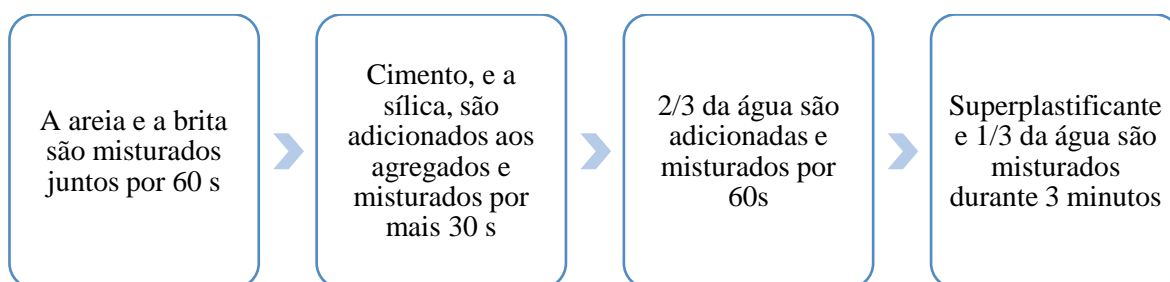


Figura 30. Procedimento de mistura adotado por Singh et al. (2018).

Para realização dessa análise optou-se por produzir um traço de CAA com 10% de AMRC, buscando avaliar se o método de produção do concreto causaria interferência na amostra produzida. Foi realizado o ensaio de espalhamento para ambas as amostras, e a diferença entre os materiais foi relativamente pequena, sendo que a metodologia de Lisbôa (2004), apresentou uma pequena redução no espalhamento, portanto prosseguiu-se o estudo utilizando o método proposto por Singh et al. (2018).

Tendo sido estabelecido o método de mistura adequado, e com o volume de pasta pré-estabelecido, foram utilizadas as equações 12 e 13 para a determinação do volume de agregados (Volume de areia + Volume de brita) necessário para a produção de um metro cúbico de concreto.

$$V_{ar} + V_{br} + V_p = 1m^3 \text{ de concreto} \quad \text{Equação 12}$$

Onde: V_{ar} é o volume de areia, V_{br} o volume de brita, e V_p equivale ao volume de pasta, todos em m^3 .

$$V_{ar} + V_{br} = V_c - V_p \quad \text{Equação 13}$$

$$V_{agr} = V_c - V_p \quad \text{Equação 14}$$

A soma do volume de areia e o volume de brita, denominado de volume de agregados (V_{agr}), é utilizada na equação 15 e 16, de modo a determinar os volumes de cada material levando em consideração os percentuais determinados no estudo do esqueleto granular.

$$\text{Volume da areia (} V_{ar} \text{)} = (\% \text{ areia}/100) \cdot V_{agr} \quad \text{Equação 15}$$

$$\text{Volume da brita (} V_{br} \text{)} = (\% \text{ brita}/100) \cdot V_{agr} \quad \text{Equação 16}$$

Para a determinação das massas de areia e massa de brita, foram aplicadas as equações 17 e 18, transformando os valores encontrados em volume (m^3) para quantidades de material em massa (kg).

$$\text{Massa de areia (} P_{ar} \text{)} = V_{ar}/\rho_{ar} \quad \text{Equação 17}$$

$$\text{Massa de brita (} P_{br} \text{)} = V_{br}/\rho_{br} \quad \text{Equação 18}$$

Por fim, determina-se a massa de cimento (kg) a ser utilizada na produção de $1 m^3$ de concreto, através da equação 19.

$$C = \frac{V_p}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{a/c}{\rho_a} + \frac{sf/c}{\rho_{sf}} + \frac{(\%sp/c) * \left(\frac{100}{T_{sp}}\right)}{\rho_{sp}} - \frac{(\%sp/c) * \left[\left(\frac{100}{T_{sp}}\right) - 1\right]}{\rho_a}} \quad \text{Equação 19}$$

Tratando-se da produção de concreto, volumes maiores são calculados, portanto, todas as equações envolvidas utilizam-se unidades de massa e volume, em kg e m³, respectivamente. De forma a ilustrar a metodologia de dosagem de forma simplificada, a seguir constam-se todas as equações empregadas no estudo.

Tabela 22. Série de equações utilizadas para o cálculo do CAA

Parâmetros pré-estabelecidos	$a/c, sf/c, sp/c, T_{sp}(\%), V_p, V_{ag}, V_{ar}, V_{br}$
Massa de água	$P_a = (a/c).C$
Massa de sílica ativa	$P_{sf} = (sf/c).C$
Massa de superplastificante sólido	$P_{sp} = (sp/c).C$
Massa de superplastificante líquido	$P_{spl} = [(sp/c).100/T_{sp}].C$
Massa de água no superplastificante	$P_{asp} = (sp/c).[(100/T_{sp}) - 1].C$
Volume da areia	$V_{ar} = (\% \text{ areia}/100).V_{ag}$
Volume da brita	$V_{br} = (\% \text{ brita}/100).V_{ag}$
Massa de areia	$P_{ar} = V_{ar}/\rho_{ar}$
Massa de brita	$P_{br} = V_{br}/\rho_{br}$
Massa de água corrigida	$P_{ac} = \{(a/c).C - P_{sp}[(100/T_{sp}) - 1] + P_{ar}(A_{ar} - H_{ar})/100 + P_{br}(A_{br} - H_{br})/100\}$
Massa de areia corrigida	$P_{arc} = P_{ar}.[1 + (H_{ar}/100)]$
Massa de brita corrigida	$P_{brc} = P_{br}.[1 + (H_{br}/100)]$

A produção do CAA iniciou-se com o traço de 0% de AMRC, de forma a avaliar se os requisitos de autoadensabilidade foram atendidos alternando o volume de pasta, optando pela amostra que apresentasse o melhor desempenho baseado no ensaio de espalhamento (slump-flow) normatizado pela NBR 15823-2 (2017). O ensaio teve análises quantitativas (através do resultado de espalhamento médio) e qualitativas (análise visual buscando indícios de segregação e exsudação) das amostras.

As composições dos CAA's com volume de pasta de 38% e 40% podem ser observadas na tabela 23.

Tabela 23. Quantitativo de materiais para dosagem de 1m³ de CAA.

Dosagem de concreto (kg/m³)			
Volume de pasta (%)	38%	Volume de pasta (%)	40%
Relação ar/Br	0,67	Relação ar/Br	0,67
Cimento	450,9	Cimento	474,6
Água (a/c = 0,47)	210,9	Água (a/c = 0,47)	220,0
Superplastificante (Sp/c = 0,6%)	2,705	Superplastificante (Sp/c = 0,6%)	2,847
Areia Natural	670,9	Areia Natural	650,8
Agregado Graúdo	997,2	Agregado Graúdo	967,3
Sílica Ativa (Sf/c = 10%)	32,3	Sílica Ativa (Sf/c = 10%)	34,0

Ao observar não apenas o resultado do espalhamento alcançado por ambos os traços, como também seu aspecto visual, concluiu-se que o concreto com volume de pasta de 40% apresentou espalhamento médio de 645mm e ausência de segregação e exsudação em sua superfície, como demonstrado nas Figuras 33 e 34.

Em contrapartida, o CAA com volume de pasta de 38%, teve espalhamento médio de 520mm, e notou-se um acúmulo de material na parte central da amostra, conforme pode ser observado nas Figuras 31 e 32.



Figura 31. CAA com volume de pasta de 38%.



Figura 32. Espalhamento do CAA com volume de pasta de 38%



Figura 33. CAA com volume de pasta de 40%



Figura 34. Espalhamento do CAA com volume de pasta de = 40%.

Portanto, uma vez que o volume de pasta de 38% não atendeu aos parâmetros estabelecidos pela NBR 15823-2 (2017) e por Gomes et al. (2003), optou-se por adotar o volume de pasta de 40% como sendo um fator fixo na dosagem de todos os traços, buscando a produção amostras que seguissem os mesmos parâmetros, realizando uma análise comparativa entre os CAA's produzidos.

A etapa seguinte foi a dosagem dos traços com ARMC, nesta etapa os teores de substituição pré-determinado (10%, 20% e 30%) foram considerados em relação ao volume de areia natural, dessa forma buscou-se reduzir a interferência entre a diferença de densidade dos dois materiais. A composição dos CAA's para produção de 1m³ de concreto consta na tabela 24.

Tabela 24. Quantitativo de materiais para dosagem de 1m³ de CAA (com e sem AMRC).

Dosagem de concreto (kg/m³)			
Volume de pasta (%)	40%	Volume de pasta (%)	40%
Relação Ar/Br	0,67	Relação Ar/Br	0,67
Cimento	474,6	Cimento	474,6
Água (a/c = 0,47)	220,0	Água (a/c = 0,47)	224,1
Superplastificante (Sp/c = 0,6%)	2,847	Superplastificante (Sp/c = 0,6%)	2,847
Areia Natural	650,8	Areia Natural	585,8
AMRC (0%)	-	AMRC (10%)	64,5
Agregado Graúdo	967,3	Agregado Graúdo	967,3
Sílica Ativa (Sf/c = 10%)	34,0	Sílica Ativa (Sf/c = 10%)	34,0
a/c efetiva	0,47	a/c efetiva	0,49

Dosagem de concreto (kg/m³)			
Volume de pasta (%)	40%	Volume de pasta (%)	40%
Relação ar/Br	0,67	Relação ar/Br	0,67
Cimento	474,6	Cimento	474,6
Água (a/c = 0,47)	226,2	Água (a/c = 0,47)	228,2
Superplastificante (Sp/c = 0,6%)	2,847	Superplastificante (Sp/c = 0,6%)	2,847
Areia Natural	520,7	Areia Natural	455,6
AMRC (20%)	129,0	AMRC (30%)	193,5
Agregado Graúdo	967,3	Agregado Graúdo	967,3
Sílica Ativa (Sf/c = 10%)	34,0	Sílica Ativa (Sf/c = 10%)	34,0
a/c efetiva	0,51	a/c efetiva	0,53

Após a definição dos traços, o primeiro ensaio no estado fresco foi o de massa específica do concreto, pois entende-se que a densidade da mistura seja um fator interessante de análise e, simultaneamente, foi realizado o ensaio de teor de ar incorporado.

Em seguida foram realizados os ensaios de autoadensabilidade: Espalhamento (Slump Flow e Slump Flow T50), Funil-V, Caixa-L e coluna de segregação. Foram utilizados os equipamentos normatizados através da NBR 15823-2 (2017), NBR 15823-3 (2017), NBR 15823-4 (2017) e NBR 15823-6 (2017).

Nesta pesquisa, para a classificação de um concreto como autoadensável era necessário que o mesmo obtivesse classificação segundo os critérios da NBR 15823 (2017) e os valores propostos por Gomes e Barros (2009) serão adotados.

Assim como as propriedades no estado fresco, buscou-se avaliar o efeito da substituição do AMRC nas propriedades mecânicas do CAA. A tabela 25 especifica a quantidade de corpos de prova confeccionados para a realização dos ensaios de compressão axial, compressão diametral, módulo de elasticidade.

Tabela 25. Método de ensaio para determinação das propriedades mecânicas.

Método de Ensaio	Idade de Rompimento (dias)	Nº de CP's por idade
Resistência à compressão NBR 5739 (2018)	7 e 28 dias	3 CP's
Resistência à tração por compressão diametral NBR 7222 (2011)		3 CP's
Determinação dos módulos estáticos de elasticidade NBR 8522 (2017)		3 CP's

Os corpos de prova cilíndricos com dimensões de 15cm x 30cm, foram moldados de acordo com as especificações da NBR 5738 (2003). Ao alcançar as idades previstas para os ensaios, conforme estipulado na tabela 25, os CP's foram levados à prensa onde o carregamento de ensaio foi aplicado continuamente com uma velocidade de carregamento de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s, mantida constante durante todo o ensaio.

Os resultados coletados nos ensaios mecânicos foram analisados estatisticamente (média aritmética, desvio padrão e coeficiente de variação) de forma a garantir a confiabilidade da amostragem adotada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos de forma a avaliar se a metodologia proposta minimizou a influência da substituição do AMN por AMRC, nas propriedades no estado fresco e propriedades mecânicas do CAA. Realizando uma discussão dos resultados, e comparando-os com os valores apresentados na literatura consultada.

4.1. Fase 2: Estudo da pasta

Conforme demonstrado no programa experimental, o estudo da pasta foi realizado através da análise dos resultados de espalhamento das misturas (sendo uma média entre duas leituras perpendiculares) e do aspecto visual (ausência de segregação e bordas uniformes), optando pela pasta com as melhores características. O espalhamento médio para cada relação a/c estudada pode ser observado na tabela 26.

Tabela 26. Espalhamento médio com variação da relação a/c.

Relação a/c		Resultados
		Espalhamento Médio (mm)
1	0,45	175,63
2	0,47	181,29
3	0,49	187,83
4	0,51	185,47
5	0,53	179,59

Observando os valores apresentados na tabela 26, pode-se notar que a relação a/c de 0,49 apresentou o maior espalhamento médio. Além disso, o aumento na quantidade de água resultou apenas numa redução no espalhamento. Na Figura 35 e 36, é possível observar que as pastas com relações a/c de 0,47 e 0,49, respectivamente, apresentaram bordas não uniformes e exsudação, sendo que a relação a/c de 0,49 teve indícios de acúmulo de material (segregação) no centro da pasta indicada pelo círculo vermelho.

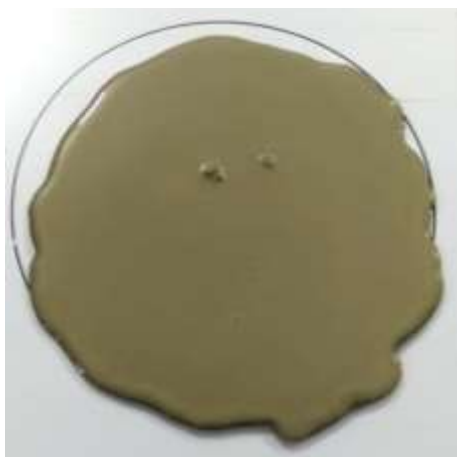


Figura 35. Pasta piloto a/c 0,47

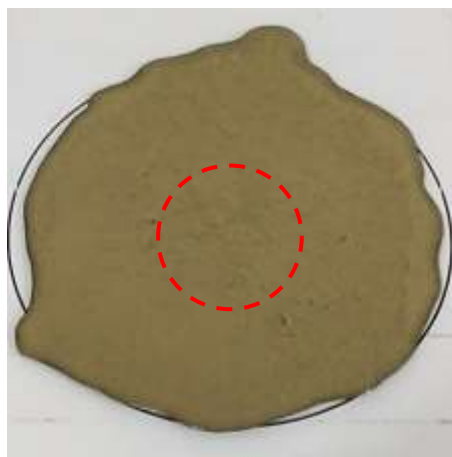


Figura 36. Pasta piloto a/c 0,49.

Analisando esse comportamento, optou-se por realizar a etapa seguinte com as duas relações a/c (0,47 e 0,49), dessa forma seria possível analisar o comportamento da pasta com a variação do teor de sílica. A sílica adicionada à pasta foi utilizada como um composto responsável por aumentar a viscosidade e controlar a fluidez. Conforme explicado no programa experimental, nesta etapa foram testados intervalos de 5% de sf/c, calculados em função da massa do cimento.

. O resultado do espalhamento médio das relações sf/c estudadas podem ser observadas na Tabela 27. Nesta etapa, a avaliação do espalhamento médio seguiu o pressuposto estabelecido por Gomes et al. (2003), com valores de 180 ± 10 mm.

Tabela 27. Espalhamento médio com variação da relação sf/c.

Pasta	Relação a/c	sf/c (%)	Resultados
			Espalhamento (mm)
1	0,47	5	191,63
2		10	180,86
3		15	162,83
4		20	130,98
5	0,49	5	191,48
6		10	184,70
7		15	168,08
8		20	135,77

Analisando os resultados apresentados, as misturas que tiveram valores de espalhamento dentro do parâmetro estabelecido foram as pastas com 10% de sf/c, para ambas as relações. No entanto, apesar de atingir o espalhamento adequado, a análise visual demonstrou que a pasta com relação a/c de 0,47 apresentou uma borda mais uniforme,

ausência de segregação e exsudação considerada relativamente menor comparada à pasta com relação a/c de 0,49, como pode ser observado nas Figuras 37 e 38.



Figura 37. Pasta piloto a/c 0,47.



Figura 38. Pasta piloto a/c 0,49.

Portanto optou-se por seguir o estudo da pasta adotando uma relação a/c de 0,47 com 10% de sílica. Em relação ao tempo de fluxo, essa verificação foi realizada apenas durante a última etapa, de forma a determinar o ponto de saturação do aditivo. Na tabela 28 podem ser observados os valores de espalhamento médio e tempo de fluxo para variações de 0,2% de sp/c.

Tabela 28. Espalhamento médio e tempo de fluxo com variação da relação sp/c.

Composição da Pasta			Resultados		
a/c	sf/c (%)	sp/c (%)	Espalhamento Médio (mm)	Tempo de fluxo (s)	
1	0,47	10	0,2	115,87	11,26
2			0,4	154,75	8,49
3			0,6	168,89	7,15
4			0,8	176,05	6,84
5			1,0	183,96	6,68

Novamente o espalhamento foi avaliado segundo os parâmetros de Gomes et al. (2003), e baseado nesta avaliação os teores de 1,0% e 0,8% atenderam aos critérios propostos. Em relação ao tempo de fluxo no cone de Marsh, foi possível correlacionar numa escala logarítmica o tempo *versus* o teor de aditivo, conforme demonstrado na Figura 39.

Segundo os ângulos internos, medidos entre as duas retas, o teor que apresentou a menor angulação seria o teor de 0,6%, considerando que a partir deste valor o tempo de fluxo apresentou pouca variação. É importante salientar que todos os ângulos internos tiveram valores superiores aos propostos pela metodologia de $140^{\circ} \pm 10$.

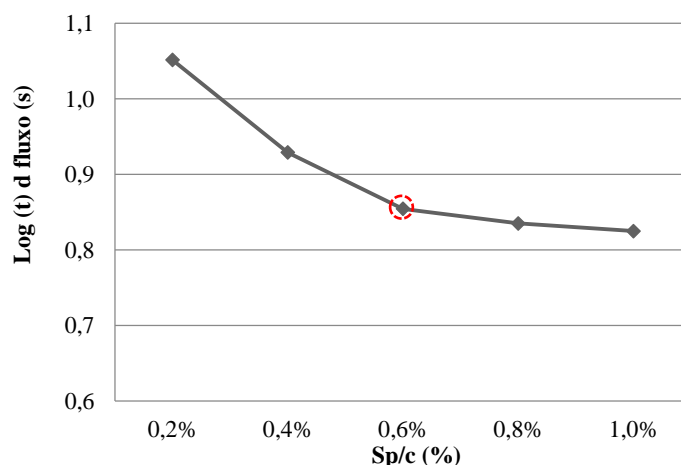


Figura 39. Tempo de fluxo (Log.) versus a variação de sp/c

Analisando visualmente a pasta com relação sp/c de 0,6%, a mesma apresentou boa coesão entre as partículas sem formação de fases distintas entre elas (indicando um problema de segregação) e bordas mais uniformes, como pode ser observado na Figura 40, além de seu espalhamento médio estar próximo ao parâmetro de 180 ± 10 mm.



Figura 40. Pasta com sp/c 0,6%.

Figura 41. Pasta com sp/c 0,8%

Figura 42. Pasta com sp/c 1,0%.

As Figuras 41 e 42, no entanto, mostram que as amostras com relações sp/c de 0,8% e 1,0%, apresentaram bordas irregulares e a formação de uma película de água na superfície quando comparadas ao teor de 0,6%.

4.1.1. Considerações sobre a fase 2

O estudo iniciou com a busca pela melhor relação a/c, e nessa etapa observou-se que o acréscimo de água não resulta, obrigatoriamente, em um aumento de espalhamento, ou seja, ao atingir um valor máximo a tendência do material é segregar sem aumento de

trabalhabilidade. O teor ideal de sílica adotado para controle da viscosidade da pasta, e o ponto de saturação do aditivo foram encontrados sem perder o parâmetro de espalhamento determinado por Gomes et al. (2003).

Wu e An (2014) indicaram que recentemente, muitos pesquisadores perceberam a importância de se investigar o CAA do ponto de vista reológico, e observaram que o controle de qualidade das propriedades reológicas nas pastas é um fator crítico para o sucesso do CAA. A importância dos conhecimentos adquiridos nesta fase pode ser comprovada, posteriormente, através do estudo da argamassa, e na fase de produção do CAA.

De forma a compreender o processo adotado para análise da reologia das pastas, foi montando um fluxograma, Figura 43, ilustrando os processos e as tomadas de decisão durante o estudo.

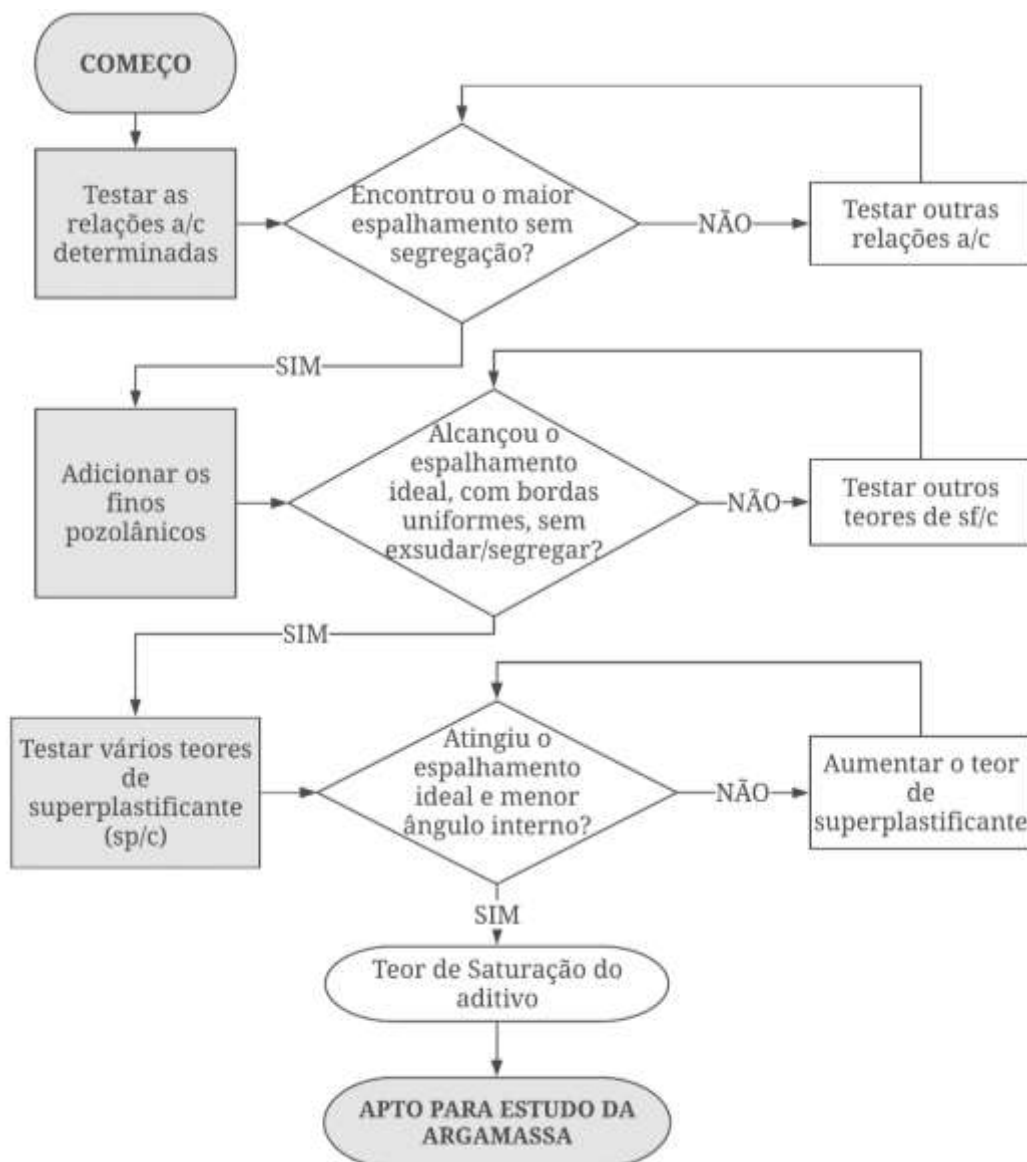


Figura 43. Fluxograma para estudo da pasta.

4.2. Fase 3: Estudo da argamassa

Conforme explicado no programa experimental, o ponto inicial desta etapa fundamenta-se na experiência obtida no desenvolvimento da pasta na fase 2, ou seja, utilizando um traço de 1:2 (cimento:areia), e as relações a/c e sf/c previamente determinadas, foi possível avaliar a influência da substituição de AMN por AMRC.

O primeiro traço produzido foi o teor de 0% de AMRC, de forma a avaliar se a presença do agregado miúdo alteraria o ponto de saturação anteriormente estabelecido. Os resultados do espalhamento médio e do tempo de fluxo constam na tabela 29.

Tabela 29. Espalhamento médio e tempo de fluxo com variação da relação sp/c em argamassas.

Composição da argamassa			Resultados		
a/c	sf/c (%)	sp/c (%)	Espalhamento Médio (mm)	Tempo de fluxo (s)	
1	0,47	0,2	116,50	60,0	
2		0,4	194,49	56,0	
3		0,6	271,28	52,0	
4		0,8	285,11	51,5	
5		1,0	289,53	51,2	

Comparando os valores apresentados na tabela 29, observou-se que a relação sp/c de 0,6% foi o teor que mais se aproximou do valor estabelecido pela EFNARC (2002) de 240 a 260 mm, e que serviu de parâmetro para análise das argamassas. E utilizando o critério do ângulo interno, segundo a Figura 44, o teor ótimo de superplastificante da argamassa seria, igualmente, o teor de 0,6% de sp/c, corroborando os teores encontrados no estudo da pasta.

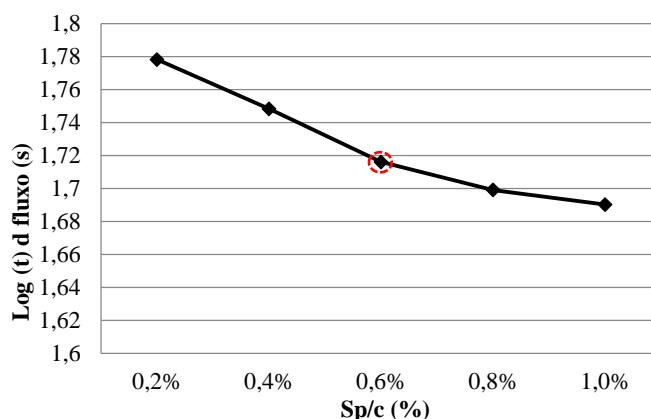


Figura 44. Tempo de fluxo (Log.) versus a variação de sp/c.

As argamassas com 0,8% e 1,0%, apesar de apresentarem um espalhamento maior, apresentaram um pequeno aumento da ocorrência de segregação (observado pelo

acumulo de material na parte central) quando da continuidade no acréscimo de aditivo, conforme os círculos vermelhos indicam nas Figuras 46 e 47.



Figura 45. Argamassa com sp/c 0,6%.

Figura 46. Argamassa com sp/c 0,8%.

Figura 47. Argamassa com sp/c 1,0%.

Baseado nesses indicativos, o teor ótimo do aditivo manteve-se em 0,6%, Figura 45. Em seguida, foram realizados os traços contendo AMRC. Os resultados do espalhamento e tempo de fluxo estão apresentados na tabela 30.

Tabela 30. Quantitativo de materiais com a relação sp/c como fator variável.

Composição da argamassa				Resultados			
	a/c	sf/c (%)	sp/c (%)	Espalhamento Médio (mm)	Tempo de fluxo (s)	Segregação	Bordas uniformes
0% AMRC	0,47	10	0,6	271,28	52,4	Não apresentou	Sim
10% AMRC				260,16	54,7	Não apresentou	Sim
20% AMRC				256,27	57,2	Não apresentou	Sim
30% AMRC				237,48	58,8	Não apresentou	Sim

Com base nos resultados apresentado observa-se que o espalhamento das argamassas teve uma redução de 8,13% e o tempo de fluxo um aumento de 12,21%, com o aumento no teor de substituição do AMRC. No entanto, segundo o critério da EFNARC (2002) apenas o traço de 30% de AMRC não se enquadrou no intervalo de 240 a 260mm. Portanto, foi produzida outra argamassa de 30% de AMRC utilizando 0,65% de Sp/c, que obteve um espalhamento de 249,56mm e tempo de fluxo de 58 s.

Analisando a influência do teor de substituição foi notado que a taxa de compensação, assim como, as relações pré estabelecidas na pasta (relação a/c e sf/c), se mostraram adequadas na produção de argamassas, apresentado espalhamentos dentro do intervalo indicado.

Foi realizada uma análise visual das argamassas, através das Figuras 48, 49, 50 e 51.

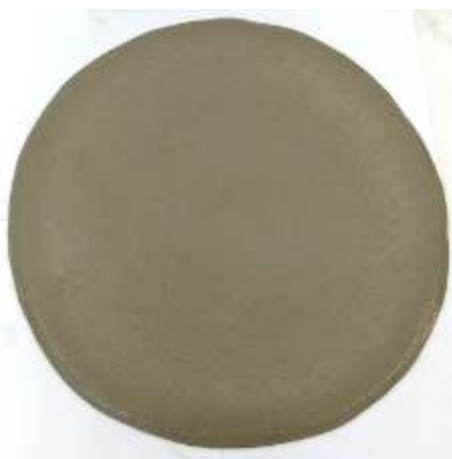


Figura 48. Argamassa com areia natural.



Figura 49. Argamassa com 10% de AMRC.



Figura 50. Argamassa com 20% de AMRC.



Figura 51. Argamassa com 30% de AMRC*.

Comparando as quatro figuras, no entanto, é possível perceber pouca variação na exsudação das argamassas, sem a formação de películas de água na superfície da amostra. Observou-se também que as bordas das argamassas permaneceram uniformes, sem grandes irregularidades.

No entanto, a Figura 50 mostra que a argamassa com substituição de 20% de AMRC apresentou bolhas na superfície, indicando a saída de ar do interior do agregado miúdo reciclado, o que pode ter ocorrido durante o processo de mistura, pois o mesmo não se repetiu na argamassa contendo 30% de AMRC.

4.2.1. Considerações sobre a fase 3

Essa etapa, como dito anteriormente, foi um estudo complementar ao método de dosagem de Gomes et al. (2003). A utilização de agregados reciclados exige que suas

singularidades sejam consideradas de forma a reduzir seu impacto nas propriedades reológicas do CAA.

Começando o estudo pela produção de argamassas contendo apenas agregados naturais, foi possível perceber a relevância dos teores determinados no estudo da pasta. O ponto mais significativo se refere ao teor de superplastificante ótimo que manteve-se em 0,6%. Indicando uma correlação entre a reologia da pasta e da argamassa.

No estudo das argamassas com teores de AMRC, inicialmente foi determinada a taxa de compensação da absorção dos agregados reciclados. Sem esse ajuste, ficou evidente que o material não atingiria uma trabalhabilidade semelhante ao da argamassa com AMN.

Como citado na revisão, o processo de pré-saturação almeja reduzir a perda de água de mistura para o AMRC, portanto optou-se por adicionar água, controlando a absorção sem comprometer significativamente a trabalhabilidade. Essa constatação levou à adoção da mesma abordagem durante a produção do CAA com AMRC na fase 5. O acréscimo de aditivo superplastificante foi considerado apenas caso o controle da absorção não tivesse resultado satisfatório, o que ocorreu na argamassa de 30% de AMRC, com acréscimo de 0,05% de aditivo.

O processo realizado durante o estudo da argamassa foi sintetizado em um fluxograma, que pode ser observado na Figura 52.

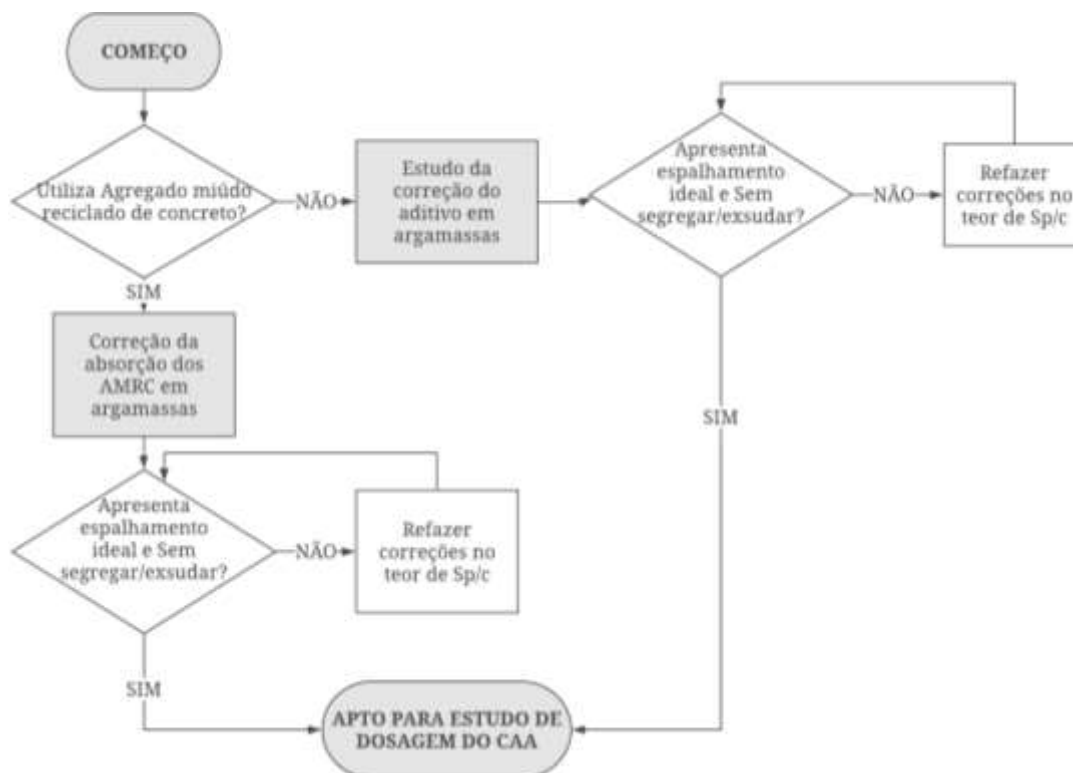


Figura 52. Fluxograma do estudo da argamassa.

4.3. Fase 4: Determinação do esqueleto granular

A mistura que apresenta a maior massa unitária e, conseqüentemente, o menor índice de vazios fornece, segundo Gomes e Barros (2009), a proporção final adequada entre os agregados graúdo e miúdo estudados para a produção do CAA, ou seja, o esqueleto granular.

De acordo com os resultados apresentados na tabela 31 a melhor composição para o esqueleto granular do CAA é a relação areia/Brita de 0,67. Considerando que 60% dos agregados devem ser constituídos por agregado graúdo e 40% por agregado miúdo. Esta combinação foi selecionada por possuir o menor teor de vazios de 31,18% e a maior massa unitária de 1,83 g/cm³.

Tabela 31. Ensaio para determinação do teor de vazios.

Brita	Areia	Brita (kg)	Areia (kg)	Peso da mistura (kg)	Massa Unitária (g/cm³)	Massa Específica (g/cm³)	Teor de Vazios
100%	0%	20	0	16,257	1,767	2,680	34,06%
90%	10%	18	2	16,716	1,816	2,675	32,06%
80%	20%	16	4	16,756	1,821	2,669	31,76%
70%	30%	14	6	16,764	1,822	2,664	31,59%
60%	40%	12	8	16,830	1,829	2,658	31,18%
50%	50%	10	10	16,780	1,823	2,653	31,24%
40%	60%	8	12	16,654	1,810	2,647	31,61%
30%	70%	6	14	16,341	1,776	2,642	32,76%
20%	80%	4	16	16,273	1,768	2,636	32,90%
10%	90%	2	18	15,785	1,715	2,631	34,78%
0%	100%	0	20	15,4781	1,682	2,625	35,91%

Tendo sido determinadas as proporções dos agregados (miúdo e graúdo), foi realizado o cálculo de dosagem, conforme as equações demonstradas no capítulo 3, e os CAA's produzidos foram avaliados quanto às suas propriedades no estado fresco e estado endurecido.

4.3.1. Considerações sobre a fase 4

Como descrito na revisão, o estudo do esqueleto granular é uma fase independente aos estudos da pasta e argamassa. Nessa etapa foi observado o teor de vazios considerando as variações areia/brita.

Os agregados miúdos reciclados de concreto não foram utilizados nessa etapa, pois o gasto de material para a execução dos testes, considerando os três teores de AMRC, excederia a quantidade de material coletado para a pesquisa.

4.4. Fase 5: Dosagem e produção do CAA

Conforme demonstrado no capítulo 3, a fase de dosagem iniciou-se com a determinação do volume de pasta ideal para a produção dos CAA's. Depois de avaliar o espalhamento e o aspecto visual das amostras adotou-se o volume de pasta de 40% como fator fixo para dosagem dos traços com teores de substituição de AMRC. E seguindo as formulações dispostas na tabela 22 foram produzidos os CAA's com AMRC, submetidos aos ensaios no estado fresco e estado endurecido, e seus resultados apresentados a seguir.

4.4.1. Propriedades no estado fresco

O primeiro ensaio realizado foi o de avaliação da habilidade passante, determinada por meio da Caixa-L segundo NBR 15823-4 (2017), pois conforme a literatura consultada este ensaio é considerado o mais determinante na avaliação da autoadensabilidade. Os resultados do ensaio podem ser visualizados na tabela 32.

Tabela 32. Resultados do ensaio da Caixa L.

Traço	Caixa-L			Parâmetros	
	TL ₂₀ (s)	TL ₄₀ (s)	H2/H1	Gomes et al. (2003)	NBR 15823-1 (2017)
CAA – 0% AMRC	1,03	2,61	0,85	≥0,80	PL1 - 2 Barras ≥0,80 PL2 - 3 Barras ≥0,80
CAA – 10% AMRC	1,15	2,79	0,83		
CAA – 20% AMRC	1,29	2,83	0,81		
CAA – 30% AMRC*	1,32	2,85	0,80		

A tendência observada com o aumento do teor de substituição do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado de concreto, assim como supracitado na revisão, é de perda de trabalhabilidade, portanto o comportamento dos CAA's produzidos esteve dentro do previsto. Segundo a tabela 32, os traços atenderam as condições admitidas pela NBR 15823-1 (2017) e Gomes et al. (2003), tendo um concreto fluido, sem apresentar bloqueio, apresentando boa distribuição do agregado graúdo.

O segundo ensaio executado na nova produção dos CAA's foi o espalhamento (Slump Flow e Slump Flow T₅₀) e os resultados estão descritos na tabela 33.

Tabela 33. Resultados do ensaio de espalhamento.

Traço	Espalhamento médio (mm)	T50 (s)	Parâmetros	
			Gomes et al. (2003)	NBR 15823-1 (2017)
CAA – 0% AMRC	648	3,52	600-800 mm 2 – 7 s	SF 1 = 550 a 650 mm
CAA – 10% AMRC	626	3,84		SF 2 = 660 a 750 mm
CAA – 20% AMRC	620	4,18		SF 3 = 760 a 850 mm
CAA – 30% AMRC*	618	4,28		VS1 ≤ 2 VS2 > 2

Semelhante ao comportamento observado no ensaio da caixa-L, a perda de trabalhabilidade foi observada com o acréscimo no teor de substituição (redução de aproximadamente 4,7%). Correlacionando com a perda de espalhamento observada nas argamassas com AMRC (aproximadamente 8,1%), notou-se que a substituição de AMRC afetou mais a reologia das argamassas.

Nas Figuras 53, 54, 55 e 56 as amostras de CAA's apresentaram uma borda uniforme, sua superfície não apresentava indício de exsudação e sem acúmulo de material, o que caracterizaria uma segregação do agregado graúdo. Durante o ensaio foi observado a presença de bolhas de ar na superfície das amostras com AMRC, e semelhante ao ocorrido no estudo da argamassa, podem ser atribuídas aos grãos de AMRC que não foram saturados liberando o ar contido em seus poros.



Figura 53. Espalhamento do CAA com 0% AMRC.



Figura 54. Espalhamento do CAA com 10% AMRC.



Figura 55. Espalhamento do CAA com 20% AMRC



Figura 56. Espalhamento do CAA com 30% AMRC

Baseado nos critérios adotados, todas as amostras de CAA apresentaram resultados satisfatórios em relação aos parâmetros de Gomes et al. (2003), e se classificaram como SF1 e VS2 segundo a NBR 15823-1 (2017).

Analisando os resultados apresentados, observou-se que a perda de trabalhabilidade em função do teor de substituição teve uma redução de 4,61% até 20% de substituição de AMRC. Aslani et al. (2018), conforme já explanado na revisão, tiveram um decréscimo abaixo de 10% para substituições de até 40%, o que torna os resultados consistentes com os apresentados por outras pesquisas.

O comportamento do CAA-30% de AMRC, apresentou uma diferença de espalhamento, o que pode ser relacionado com o aumento do teor de superplastificante durante a etapa anterior. Analisando o aspecto das misturas, não foram observados presença de segregação, porém as amostras contendo AMRC apresentaram bolhas na superfície, fato acentuado proporcionalmente ao aumento do teor de agregado reciclado.

Também foram realizados os ensaios de massa específica no estado fresco e do teor de ar incorporado através do método pressométrico. Seus resultados podem ser observados na tabela 34.

Tabela 34. Resultado do ensaio de teor de ar incorporado.

Traço	Teor de Ar incorporado	Massa específica (kg/cm³)
CAA – 0% AMRC	2,0%	2417,6
CAA – 10% AMRC	2,0%	2397,6
CAA – 20% AMRC	3,0%	2271,0
CAA – 30% AMRC*	4,0%	2237,6

Os resultados serviram para corroborar a análise visual, pois o aumento do teor de AMRC, gerou aumento de ar incorporado. Isso pode ser relacionado com a porosidade e com a perda da água adsorvida aos grãos de AMRC. Baseado em constatações nas três fases (pasta, argamassa e concreto) observou-se uma tendência do superplastificante de incorporação de ar ao aumentar a fluidez.

A massa específica do CAA sofreu uma redução de, aproximadamente, 8%, relativos à presença do AMRC com massa específica menor que o AMN. Baseado nos dois resultados (teor de ar incorporado e massa específica) pode-se deduzir que o aumento do teor de substituição resulte em um aumento da porosidade do CAA.

O tempo de fluxo do CAA foi determinado pelo ensaio do Funil-V, de acordo com a NBR 15823-5 (2017). Os valores do tempo de fluxo se adequaram aos valores propostos por Gomes et al. (2003), e se classificaram como VF1 segundo os parâmetros da NBR 15823-1 (2017). Os resultados do tempo de fluxo podem ser analisados na tabela 35.

Tabela 35. Resultado do ensaio do Funil-V.

Traço	Tempo de Fluxo (s)	Parâmetros	
		Gomes et al. (2003)	NBR 15823-1 (2017)
CAA – 0% AMRC	6,5	6 a 15	VF 1 < 9 VF 2 > 9 ≤25
CAA – 10% AMRC	6,8		
CAA – 20% AMRC	7,0		
CAA – 30% AMRC*	8,0		

Por fim, foi realizado o ensaio na coluna de segregação com o objetivo de observar a estabilidade dos traços de CAA, garantindo que seja mantida a coesão da mistura durante o lançamento no interior de formas. Os resultados do ensaio podem ser analisados na tabela 36.

Tabela 36. Resultado do ensaio da coluna de segregação.

Traço	SR (%)	Parâmetros	
		Gomes et al. (2003)	NBR 15823-1 (2017)
CAA – 0% AMRC	2,41%	0 – 15%	SR 1 ≤ 15% SR 2 ≤ 20%
CAA – 10% AMRC	7,90%		
CAA – 20% AMRC	8,52%		
CAA – 30% AMRC*	8,70%		

O índice de segregação relativa (SR) observada ficou bem abaixo dos teores indicados tanto pela NBR 15823-1 (2017) quanto por Gomes et al. (2003), o que significa que a influência da substituição de AMN por AMRC na estabilidade do CAA foi relativamente baixa (aumento de 6,29%). Esses parâmetros são importantes garantir que após o lançamento do concreto no interior de formas, o manteriam continue coeso e homogêneo.

4.4.2. Propriedades no estado endurecido

Conforme descrito no capítulo do programa experimental, foram realizados ensaios de compressão axial, compressão diametral, aos 7 e 28 dias. A prensa foi programada de acordo com a área dos CP's e utilizaram-se pastilhas de neoprene para a acomodação dos corpos de prova no equipamento. Os resultados do ensaio de compressão axial estão na tabela 37.

Baseado nos resultados apresentados observou-se que a resistência do CAA reduz com o teor de substituição de AMRC, essa redução (aproximadamente 40%) corrobora os dados coletados na revisão. Carro-Lopez et al. (2015), concluiu em seu estudo que os traços com agregado miúdo reciclado de concreto de 0% e 20% se comportam de maneira semelhante.

Tabela 37. Resultado da resistência à compressão dos traços.

Traço	Compressão Axial (MPa)					
	7 dias			28 dias		
	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
CAA – 0% AMRC	19,67	0,47	2,40	34,27	0,28	0,82
CAA – 10% AMRC	18,83	0,30	1,60	31,63	0,60	1,88
CAA – 20% AMRC	15,20	0,22	1,45	25,08	0,12	0,46
CAA – 30% AMRC*	13,65	0,18	1,34	20,36	0,23	1,11

Segundo a NBR 8953 (2014) os concretos produzidos se enquadraram na classe de concreto estrutural, tendo excedido os 20,0 MPa estipulados pela norma, no entanto,

conforme explanado na revisão ainda existem muitas restrições ao uso de agregados reciclado em elementos estruturais.

Em seguida, foram realizados os ensaios de compressão diametral, segundo método de Lobo-Carneiro. Na tabela 38, são apresentados os valores de resistência à tração dos traços.

Tabela 38. Resultados da resistência à tração.

Traço	Compressão diametral (MPa)					
	7 dias			28 dias		
	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
CAA – 0% AMRC	1,90	0,02	1,25	3,35	0,03	0,82
CAA – 10% AMRC	1,86	0,02	0,99	3,05	0,04	1,31
CAA – 20% AMRC	1,50	0,03	1,89	2,31	0,05	1,98
CAA – 30% AMRC*	1,26	0,02	1,66	2,08	0,03	1,44

Segundo os resultados na tabela 38, os traços com AMRC reagiram de forma semelhante ao indicado por Modani e Mohitkar (2014), onde a resistência à tração diminui à medida que a taxa de incorporação de AMRC aumenta. A ligação deficiente entre a argamassa antiga aderida aos grãos de AMRC e o agregado natural original ao qual a argamassa é aderida, além do formato alongado dos grãos de agregado graúdo, contribuem para a redução desta propriedade.

Os resultados do módulo de elasticidade, influenciados pela densidade do CAA no estado endurecido, sofrem uma redução, explicada pela menor rigidez do ARC. Os resultados podem ser observados na tabela 39.

Tabela 39. Resultado do módulo de elasticidade.

Traço	Módulo de Elasticidade – E_c (GPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
CAA – 0% AMRC	24,25	0,14	0,42
CAA – 10% AMRC	23,54	0,32	1,37
CAA – 20% AMRC	22,87	0,26	1,15
CAA – 30% AMRC*	22,65	0,23	1,04

Pode ser observado pelos resultados apresentados na tabela 39 que o módulo de elasticidade apresentou uma redução de 6,57% para teores de substituição de AN por AMRC de até 30%. A redução no valor do módulo de elasticidade é explicada pela menor rigidez do ARC (em relação ao AN) devido à argamassa antiga aderida ao agregado original e pela redução da densidade das misturas no estado fresco.

De modo geral, houve uma redução das propriedades mecânicas dos concretos, no entanto, enfatiza-se que a redução, nos traços utilizando até 10% de AMRC, foi de menos de 8% (na resistência à compressão) e menos de 9% (na resistência à tração). E os demais traços se enquadram na resistência exigida para concreto estrutural, segundo a NBR 8953 (2015).

4.4.2.1. Análise de variância

Foi realizada uma análise de variância (ANOVA) com os valores da resistência à compressão, resistência à tração e do módulo de elasticidade aos 28 dias, e seus resultados podem ser observados na tabela 40.

Tabela 40. Resultados da análise de variância

	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Média Quadrática	Fator F	Valor p	Diferença significativa
Resistência a Compressão aos 28 dias						
Traço	357,8307	3	119,2769	956,895	0,000000000147	SIM
Resistência a Tração aos 28 dias						
Traço	3,23790625	3	1,079302083	805,7	0,0000000002911	SIM
Módulo de Elasticidade aos 28 dias						
Traço	4,684300000	3	1,561433333	26,2868	0,000170428	SIM

A análise demonstrou que existe uma diferença significativa entre os traços pesquisados e infere-se também que a taxa de substituição adotada influencia fortemente as respostas das propriedades mecânicas dos CAA produzidos.

Essa diferença, no entanto, pode ser estudada de forma a tentar agrupar os materiais que apresentem comportamento semelhante, através do teste de Tukey. Os resultados dessa análise estão na tabela 41.

Tabela 41. Resultados do teste de Tukey

Taços	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
Comparações Múltiplas – Resistência à compressão aos 28 dias				
AMRC10-AMRC0	-2,64	-3,563144274	-1,716855726	0,00007567685
AMRC20-AMRC0	-9,19	-10,11314427	-8,266855726	0,00000000789
AMRC30-AMRC0	-13,91	-14,83314427	-12,98685573	0,00000000021
AMRC20-AMRC10	-6,55	-7,473144274	-5,626855726	0,00000005201
AMRC30-AMRC10	-11,27	-12,19314427	-10,34685573	0,00000000194
AMRC30-AMRC20	-4,72	-5,643144274	-3,796855726	0,00000093733
Comparações Múltiplas – Resistência à tração aos 28 dias				
AMRC10-AMRC0	-0,298333333	-0,394032533	-0,202634134	0,0000400580272
AMRC20-AMRC0	-1,038333333	-1,134032533	-0,942634134	0,0000000046856
AMRC30-AMRC0	-1,268333333	-1,364032533	-1,172634134	0,0000000009112
AMRC20-AMRC10	-0,74	-0,8356992	-0,6443008	0,0000000285143
AMRC30-AMRC10	-0,97	-1,0656992	-0,8743008	0,0000000071294
AMRC30-AMRC20	-0,23	-0,3256992	-0,1343008	0,0002648475601
Comparações Múltiplas – Módulo de Elasticidade aos 28 dias				
AMRC10-AMRC0	-0,71	-1,347260003	-0,072739997	0,030012469
AMRC20-AMRC0	-1,376666667	-2,01392667	-0,739406664	0,000557485
AMRC30-AMRC0	-1,6	-2,237260003	-0,962739997	0,000194112
AMRC20-AMRC10	-0,666666667	-1,30392667	-0,029406664	0,040635801
AMRC30-AMRC10	-0,89	-1,527260003	-0,252739997	0,008953622
AMRC30-AMRC20	-0,223333333	-0,860593336	0,41392667	0,687078769

Considerando os resultados apresentados na tabela 41, foi possível inferir que apenas os teores de AMRC de 20% e 30%, quanto ao módulo de elasticidade aos 28 dias, não apresentaram diferença significativa, isso pode ser evidenciado na Figura 57.

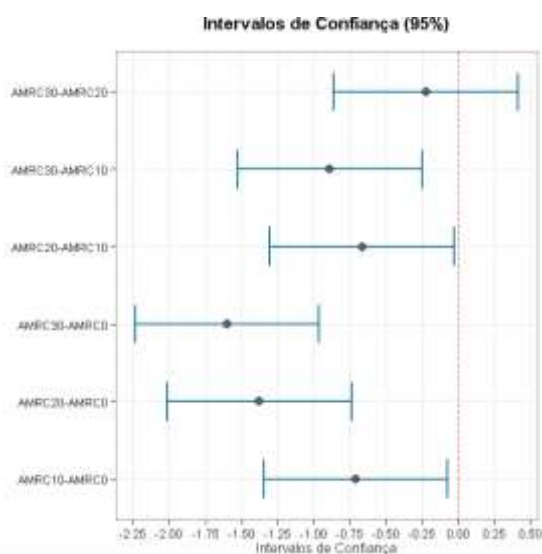


Figura 57. Resultado da análise da variância (ANOVA) pelo teste de Turkey.

O módulo de elasticidade do CAA com teores de AMRC tinham a tendência a reduzir com o acréscimo de substituição, o que foi demonstrado através dos resultados apresentados na tabela 40.

No entanto, essa análise serviu para averiguar as similaridades no comportamento de traços distintos. Portanto, a rigidez do CAA tende a ser pouco afetada ao utilizarmos substituições de 20% ou 30%. Conseqüentemente, todos os demais teores pesquisados apresentaram respostas com diferenças significativas entre si.

4.4.3. Considerações sobre a fase 5

Inicialmente, durante a etapa de dosagem dos traços o primeiro fator observado foi o consumo de cimento. O consumo adotado para um volume de pasta de 40% foi de, aproximadamente, 480 kg/m³, um valor considerado elevado quando comparado à produção de concretos convencionais, no entanto considerando a literatura consultada autores como Corinadesi et al. (2002) utilizaram consumos de até 500 kg/m³ na produção de CAA com agregados reciclados.

Durante o processo de produção do CAA com areia, já foi possível observar que as formulações adotadas pelo método de dosagem se mostraram adequadas à produção de um material coeso e fluido. O que comprova a eficiência dos estudos preliminares executados.

A dosagem do CAA com teores de AMRC levou em consideração o conhecimento adquirido no estudo da argamassa, e utilizou um acréscimo de água para compensar a absorção do agregado reciclado. Essa metodologia, no entanto, resultou em um aumento da relação a/c efetiva dos CAA com AMRC e, conseqüentemente, redução de resistência mecânica.

A escolha de não deduzir da água disponível para mistura, a taxa de compensação da absorção do AMRC, foi motivada por pesquisas como as de Safiudin et al. (2011) e de Grdic et al. (2005) que concluíram que o ajuste deve ser feito adicionando água ou aumentando o superplastificante. Como o teor de aditivo utilizada nesse estudo já se encontrava em seu ponto de saturação, o seu aumento poderia acarretar em problemas de exsudação excessiva na superfície do CAA.

Enfatiza-se que único teor que necessitou de ajuste em sua formulação, como explicado previamente, foi o traço com 30% de AMRC, demonstrando o quão enriquecedor a construção do método de dosagem foi, para a compreensão do efeito que os

agregados reciclados teriam no concreto produzido. Com a adoção destes estudos preliminares, pode ser percebida uma economia na perda de material descartado durante o estudo, que é considerado um fator positivo.

Relacionando os resultados apresentados pelos ensaios de autoadensabilidade a tendência que se observou foi uma redução da viscosidade plástica, habilidade passante e aumento da segregação, os três parâmetros que determinam a eficiência do concreto autoadensável. Na tabela 42 podemos observar o desempenho dos traços dosados de acordo com os ensaios de autoadensabilidade aplicados e segundo os parâmetros de Gomes et al. (2003) e a NBR 15823-1 (2017).

Tabela 42. Ensaio de autoadensabilidade dos traços pesquisados.

Método de Ensaio	CAA – 0% AMRC	CAA – 10% AMRC	CAA – 20% AMRC	CAA – 30% AMRC*	NBR 15823 - 1 2017	Gomes et al. (2009)
Espalhamento (mm)	648	626	620	618	550 a 850	600 a 800
T50(s)	3,52	3,84	4,18	4,28	≤ 2	2 a 7
					> 2	
Funil – V (s)	6,5	6,8	7,0	8,0	< 9	6 a 15
					9 a 25	
Caixa – L (h₂/h₁)	0,85	0,83	0,81	0,80	≥ 0,80	≥ 0,80
Coluna de Segregação (%)	2,41	7,90	8,52	8,70	≤ 20	≤ 15
					≤ 15	

Observa-se que quanto à autoadensabilidade do material, todos os teores apresentaram resposta satisfatória, pois os testes preliminares garantiram que durante a etapa de produção do CAA as singularidades dos agregados reciclados conseguiram ser contornadas sem ultrapassar os limites indicados pela norma NBR 15823-1 (2017) e por Gomes et al. (2003).

As propriedades mecânicas também apresentaram redução relativa ao aumento no teor de substituição de AMRC, uma ocorrência anteriormente comprovada por pesquisadores como Kou e Poon (2009), Grdic et al. (2010), Pereira-de-Oliveira et al. (2014), entre outros. As justificativas apresentadas, corroboram a ideia de que, a zona de transição do concreto antigo, torna-se um ponto de fragilidade nos agregados reciclados de concreto. Essa fragilidade foi amenizada, por alguns autores, com a utilização de concretos de alta resistência na produção do agregado reciclado.

Contudo, nesta pesquisa o intuito foi utilizar agregados miúdos reciclados de concreto de fontes desconhecidas na produção de um CAA com propriedades no estado fresco e endurecido que atendessem às prescrições normativas, o que foi alcançado ao final do estudo.

A fim de demonstrar o processo realizado durante todo o estudo foi concebido um fluxograma com todos os processos adotados na metodologia, e este pode ser observado na Figura 58.

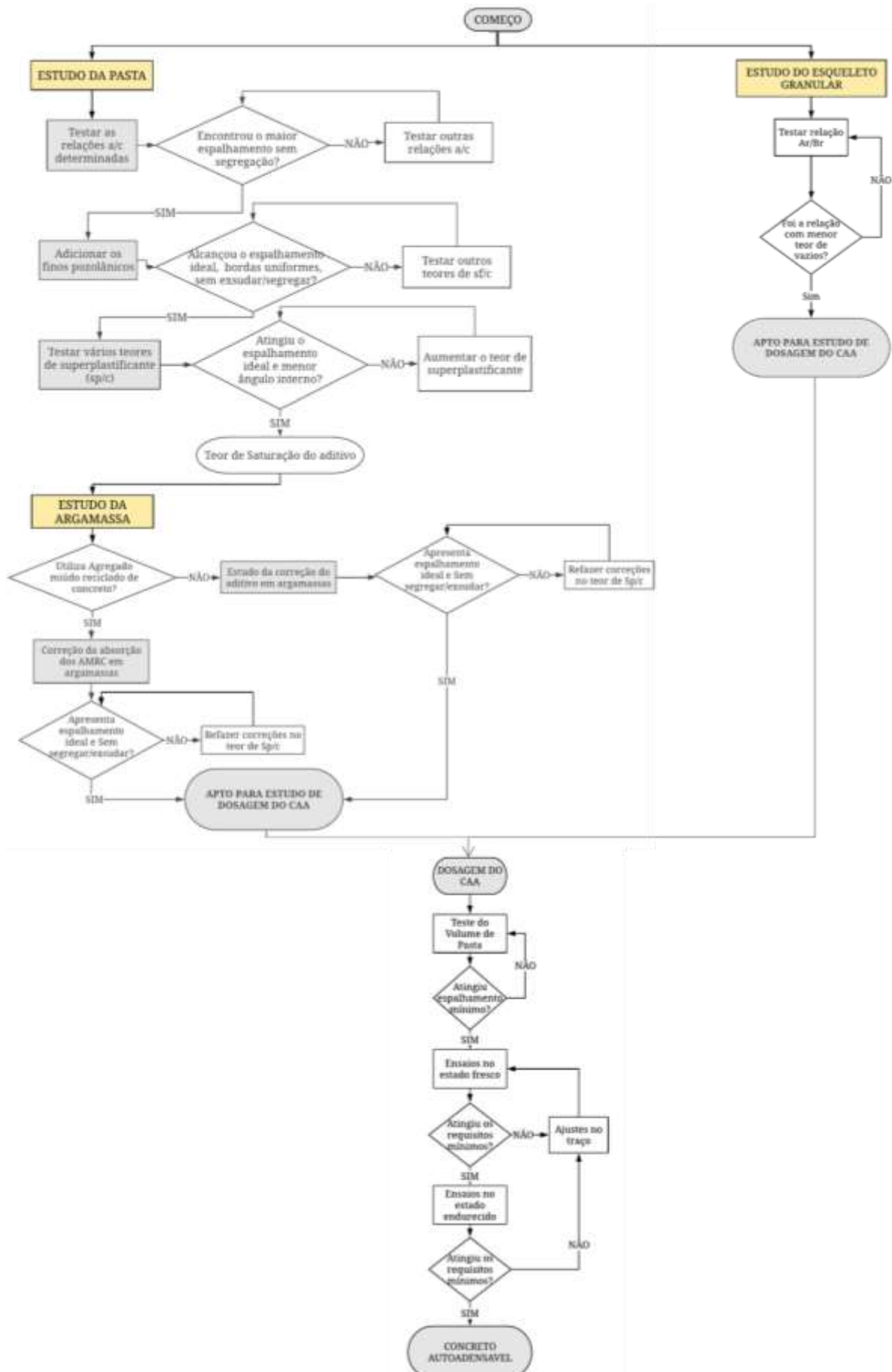


Figura 58. Fluxograma completo para produção do CAA.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho objetivava realizar uma adequação da metodologia de dosagem para concreto autoadensável com substituição parcial do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado de concreto (AMRC), avaliando suas propriedades no estado fresco e endurecidos.

Com relação a do estudo da fase da argamassa nas propriedades do concreto autoadensável produzido, concluiu-se que as propriedades no estado fresco da argamassa apresentaram uma elevada correlação com o desempenho do CAA nos traços com AMRC. Esse aspecto foi comprovado pelo teor de aditivo que se manteve constante durante a produção dos dois materiais.

Sobre avaliar o efeito da substituição do agregado miúdo natural por AMRC na autoadensabilidade do CAA, todos os parâmetros que caracterizam um CAA sofreram redução em função do aumento do teor de AMRC. Mas a metodologia tornou possível a produção de concretos autoadensáveis utilizando teores de até 30% de substituição, com o mínimo de ajustes necessários, enquadrando-os nos parâmetros estabelecidos pela NBR 15823-1 (2017) e por Gomes et al. (2003).

Em relação ao efeito do teor de substituição de agregado miúdo natural por AMRC nas propriedades mecânicas do CAA, as amostras tiveram reduções nas resistências à compressão axial, à tração e o módulo de elasticidade conforme o demonstrado na revisão. No entanto, todos os traços se enquadraram na classe de resistência de concretos estruturais segundo a NBR 8953 (2014).

Conclui-se, portanto, que as adaptações realizadas no método de Gomes et al. (2003), o qual utiliza como base o estudo de duas fases distintas (pasta e esqueleto granular), provaram-se satisfatórias na produção de CAA com agregado miúdo reciclado de concreto, com o mínimo de ajustes necessários.

O uso de agregados miúdos reciclados de concreto na produção de concreto autoadensável, apesar de impactar as propriedades no estado fresco e endurecido, demonstra ser tecnicamente viável, sendo o teor de 10% de substituição aquele que apresentou as menores reduções. E, embora os teores de substituição de até 30% tenham obtidos respostas satisfatórias, é importante analisar o consumo de cimento que será necessário para atingir os mesmos parâmetros de um CAA de referência.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se sugerir:

- Utilizar outras variações de volume de pasta, buscando avaliar a influência dessa variação nas propriedades do CAA com AMRC.
- Realizar uma pesquisa experimental que utilize outros ensaios reológicos para avaliar a influência da substituição do AMN por AMRC em CAA's.
- Desenvolvimento de CAA com outros resíduos e/ou subprodutos gerados pela indústria da construção, de forma a avaliar suas propriedades no estado fresco e endurecido.
- Realizar uma análise de viabilidade econômica com os traços produzidos, de maneira a comensurar seu valor de mercado.
- Realizar uma análise da durabilidade dos traços, avaliando aspectos como a porosidades do CAA, a resistência elétrica e carbonatação em amostras com AMRC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABED, M., NEMES, R., TAYEH, B.A., Properties of Self-Compacting High-strength Concrete Containing Multiple Use of Recycled Aggregate, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* (2018).

ABREU, V., EVANGELISTA, L., DE BRITO, J. The effect of multi-recycling on the mechanical performance of coarse recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials*. Volume 188, 10 November 2018, Pages 480-489. 2018.

AÏTCIN, Pierre-Claude. *High-performance concrete*. London, New York, E. & F. N. Spon, 1998.

AKBARNEZHAD, A; ONG, K. C. G.; ZHANG, M. H.; TAM, C. T.; FOO, T. W. J. Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. Volume 25, Issue 8, August 2011, Pages 3469-3479. 2011.

ALENCAR, R. S. A. Dosagem do concreto autoadensável: produção de pré-fabricados. São Paulo-SP, 2008. Dissertação Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ALENCAR, R. S. A; HELENE, P. R. L. Concreto autoadensável de elevada resistência: Inovação tecnológica na indústria de pré-fabricados. In: *Revista Concreto & Construções*. Ed. IBRACON. n. 43. São Paulo, p. 46-52, 2006

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test for static segregation of self-consolidating concrete using column technique. C 1610. Philadelphia, 2006;

_____. ASTM C128-15. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. 2015.

_____. ASTM C29 / C29M. Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate. 2009.

ANGULO, S. C. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico dos concretos. 2005. 149 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ARAUJO, J.L.; BARBOSA, N.P.; DOS SANTOS, S.B; REGIS, P.A. Concreto autoadensável com materiais locais no nordeste brasileiro. In: 45° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. CD-ROM, Vitória, 2003.

ASLANI, Farhad; MA, Guowei; WAN, Dominic Law; MUSELIN, Yim Gojko. Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules. *Journal of Cleaner Production* 182. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). *Panorama dos Resíduos sólidos no Brasil*. Av. Paulista, 807 - 2o andar - São Paulo – SP. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15823-1**. Concreto autoadensável. Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15823-2**. Concreto autoadensável. Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 15823-3**. Concreto autoadensável. Parte 3: Determinação da habilidade passante - Método do Anel-J. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 15823-4**. Concreto autoadensável. Parte 4: Determinação da habilidade passante - Método da Caixa-L e da Caixa U. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 15823-5**. Concreto autoadensável. Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do Funil-V. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 15823-6**. Concreto autoadensável. Parte 6: Determinação da resistência à segregação - Método da coluna de segregação. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 15116**. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 16697**. Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 11578**: Cimento Portland Composto – Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 13956-1**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 16607**: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega – Procedimento. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 248**: Agregados. Determinação da composição granulométrica, 2001.

_____. **NBR NM 26**: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 27**: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (ABRECON). Relatório Pesquisa Setorial 2014/2015. São Paulo, 2015. Disponível em: < [HTTP://www.abrecon.org.br](http://www.abrecon.org.br).

- AWOYERA, Paul O.; NDAMBUKI, Julius M.; AKINMUSURU, Joseph O.; OMOLE, David O. Characterization of ceramic waste aggregate concrete. *HBRC Journal*. Available online 2 December 2016.
- BANDI, M.; PATEL, Y. J.; VYAS, V. H. Study on Fresh and Hardened Properties of Self Compacted Concrete Using Recycled Concrete Aggregate. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. Vol. 5, Issue 5, May. 2016.
- BANFILL, P. F. G. Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials. *Construction and Building Materials*, v. 8, n. 1, p. 43-49, 1994.
- BETHMONT, S.; SCHWARTZENTRUBER, L.D'Aloia; STEFANI, C.; TAILHAN, J.L.; ROSSI, P. Contribution of granular interactions to self compacting concrete stability: Development of a new device. *Cement and Concrete Research*. Volume 39, Issue 1, January 2009.
- BOGAS, J. Alexandre; DE BRITO, J.; RAMOS, Duarte. Freeze–thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*. Volume 115, March 2016.
- BOSILJKOV, V. B. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. In: *Cement and concrete research*. Islândia, p. 1279-1286, 2003
- BRAMESHUBER, W. Three years of approvals for SCC – a report from the field. *Concrete Precasting Plant and Technology*, v. 70, n.2, p. 78-79, 2004.
- BRASILEIRO, MATOS. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. *Cerâmica* 61 (2015) 178-189. 2015.
- BUSNELLO, Emerson Cremm; SANTOS, Antonio Damião dos; Propriedades do Concreto Autoadensável em pisos Industriais. In: *Revista Concreto & Construções*. São Paulo, v. 1, n. 51, p. 58-62, 2008;
- BUTTNER, A. M. Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto-influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- CABRAL, A. E. B. Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD. 2013. 254 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- CABRAL, A. E. B. Propriedades mecânicas e modelagem da durabilidade de agregados reciclados de concreto. considerando a variabilidade de resíduos de construção e demolição. Ph.D. tese de doutorado da Universidade de São Paulo; 2007 (em Português).
- CAMPOS, Renan Serralvo. Concreto Autoadensável Produzido com Resíduos De Construção e Demolição: Propriedades Mecânicas e Reológicas. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Campinas, 2017.
- CARRO-LÓPEZ, D., GONZÁLEZ-FONTEBOA, B., DE BRITO, J., MARTÍNEZ-ABELLA, F., GONZÁLEZ-TABOADA, I., SILVA, P. Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.*, 96, 2015.
- CAVALCANTI, D. J. de H. Contribuição ao estudo de propriedades do concreto autoadensável visando sua aplicação em elementos estruturais. 2006, 141 p. Dissertação de

Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2006.

CAVALHEIRO, A. P. Contribuição para a implementação de agregado reciclado de concreto em uma empresa de pré-fabricados de concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.

CEMENT STATISTICS. US Geol. Surv. Miner. Commod. Summ (2016). Disponível em: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/mcs-2016-cemen.pdf>>

COPPOLA, L. Rheology and mix proportioning of self-compacting concretes. *Industria Italiana del Cemento*, v.71, n.2, Feb. 2001.

COPPOLA, L. Self-compacting concrete. In: *Concrete Technology*, p. 42-47, 2000.

CORINALDESI, V., MORICONI, G. Self-compacting concrete: A great opportunity for recycling materials. in *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*, 10 p. 2004.

DE JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*. Volume 23, Issue 2, February 2009, Pages 872-877. 2009.

DE LARRARD, F. Concrete before casting: recent advances in concrete mixing and pumping technology. In: *5th EPUSP Symposium on Concrete Structures*, São Paulo, Junho-2003.

DE LARRARD, F. de. Concrete mixture proportioning. A scientific approach. 1999.

DE LARRARD, F. et al. New Rheometer for Softto-Fluid Fresh Concrete. *ACI Materials Journal*, v. 94, n. 3, p. 234-243, 1997.

EFNARC - EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). Specification and guidelines for self-compacting concrete. In: EFNARC, fevereiro, 2002. Disponível em: <http://www.EFNARC.org/pdf/SandGforSCC.PDF>. Acesso em: 28 Set. 2017.

EN 12350-8: testing fresh concrete. Part 8: self-compacting concrete, slump-flow. CEN, European. Committee for Standardization Brussels; 2009. 12 p.

EN 12350-9: testing fresh concrete. Part 9: self-compacting concrete, V-funnel test. CEN, European. Committee for Standardization Brussels; 2009. 11 p.

ETXEBERRIA, M. et al. Influence of Amount of Recycled Coarse Aggregates and Production Process and Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 5, p. 735-742, 2006.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A. et al., Influence of the amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Res.* 37 (5), 2007.

EVANGELISTA, L. DE BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates *Cement Concr. Compos.*, 29 (5), 2007.

EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Concrete with fine recycled aggregates: a review. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, 18 (2) (2014), pp. 129-172. 2014.

EVANGELISTA, L.; GUEDES, M.; DE BRITO, J.; FERRO, A.C.; PEREIRA, M.F. Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from

concrete waste. *Construction and Building Materials*. Volume 86, 1 July 2015, Pages 178-188. 2015.

FAN, Cheng-Chih; HUANG, Ran; HWANG, Howard; CHAO, Sao-Jeng. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes. *Construction and Building Materials*. Volume 112, 1 June 2016.

FERREIRA, L.; DE BRITO, J.; BARRA, M. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on the fresh and hardened properties of concrete. *Mag Concr Res*, 63 (8), 2011.

FOCHS, R. GÓMEZ. Estudo Comparativo Entre Métodos De Dosagem De Concreto Autoadensável. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. DISSERTAÇÃO. Porto Alegre. 2011.

GIBBS, J. Self-compacting concrete – getting it right. *Concrete (London)*, v. 38, n.6, p. 10-13, June 2004.

GOMES, P. C. C. Optimization and Characterization of High-Strength Self- Compacting Concrete. 2002, 139 p. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2002.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. Métodos de dosagem de concreto autoadensável. São Paulo: Pini, 2009.

GOMES, P. C.C.; LISBOA, E. M.; CAVALCANTE, D. J. H.; BARROS, A. R.; BARROS, P. G. S.; LIMA, F. B. de; BARBOZA, A. S. R. Concreto Auto-Adensável: Obtenção, Propriedades e Aplicações. In: Simpósio Internacional sobre Concretos Especiais, 4º, 2008, Fortaleza-CE. [S.l.;s.n.] Disponível em: <<http://sinco2008.sobral.org>>. Acesso em: 03 de dezembro de 2018.

GOMES, P. C.C.; LISBÔA, E. M.; CAVALCANTE, D. J. H.; BARROS, A. R.; BARROS, P. G. S.; LIMA, F. B. de; BARBOZA, A. S. R. Concreto Autoadensável: Obtenção, Propriedades e Aplicações. In: Simpósio Internacional sobre Concretos Especiais, 4º, 2008, Fortaleza-CE. [S.l.;s.n.] Disponível em: <<http://sinco2008.sobral.org>>. Acesso em: 18 Set. 2017.

GONÇALVES, P. C. M. Betão com agregados reciclados. Análise comentada da legislação existente. Dissertação (Mestrado) - Instituto Técnico Superior - Engenharia Civil. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal. 2007.

GRDIC, Z. J. et al. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 7, p. 1129-1133, 2010.

GRDIĆ, Z.; TOPLIČIĆ-ĆURČIĆ, G.; DESPOTOVIĆ, I. Properties of self-compacting concrete with different type of additives. *Facta Univ Series: Architect Civ Eng*, 6 (2) 2008.

GRDIC, Z.J.; TOPLICIC-CURCIC, G.A.; DESPOTOVIC, I.M.; RISTIC N.S. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.*, 24, 2010.

GUERREIRO, Mara Rubia Freitas. Utilização de aditivo estabilizador de hidratação (AEH) como proposta de reciclagem dos resíduos de concreto usinado. Centro universitário feevale. Programa de pós-graduação em gestão tecnológica. Mestrado em qualidade ambiental. Novo Hamburgo, 2007.

HANSEN, T.; NARUD, H. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate *Concr. Int.*, 5 (1), 1983.

- HO, D.W.S; SHEINN, A.M.M; NG, C.C; TAM, C.T. The use of quarry dust for SCC applications, *Cement and Concrete Research*, Volume 32, Issue 4, 2002, Pages 505-511, ISSN 0008-8846, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00726-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00726-8). 2002.
- HO, D.W.S; SHEINN, A.M.M; TAM, C.T. The sandwich concept of construction with SCC. In: *Cement and Concrete Research*, n. 31, p. 1377-1381, 2001.
- HO, D.W.S; SHEINN, A.M.M; TAM, C.T. The use of quarry dust for SCC applications. In: *Cement and Concrete Research*, n. 32, p. 505-511, 2002.
- HUANG, Yaoying; YUAN, Bin; et al. Studies on the wet expansion deformation of hydraulic concrete with fly ash under non-standard temperatures. *Case Studies in Construction Materials*. Volume 8, June 2018.
- JOHN, V.M. Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo, 2000. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- KHAYAT, K. H. Optimization and performance of air -entrained, self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, v. 97, n. 5, p. 526-535, Sept./Oct. 2000.
- KHAYAT, K. H. Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating. *ACI Materials Journal*, v. 94, n. 4, 1999, p. 346-353.
- KHODAIR, Yasser; BOMMAREDDY, Bhagiratha. Self-consolidating concrete using recycled concrete aggregate and high volume of fly ash, and slag. *Construction and Building Materials* 153. 2017.
- KHOSHKENARI, Adel Gorjinia; SHAFIGH, Payam; MOGHIMI, Mahmoud; MAHMUD, Hilmi Bin. The role of 0–2 mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete. *Materials & Design*. Volume 64, December 2014
- KOU, S.C. POON, C.S. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates *Cem. Concr. Comp.*, 31. 2009.
- KUMAR, B.M. Vinay; ANANTHAN, H.; BALAJI, K.V.A. Experimental studies on utilization of coarse and finer fractions of recycled concrete aggregates in self compacting concrete mixes. *Journal of Building Engineering*. Volume 9, January 2017.
- LEITE, M.; FIGUEIRÊDO FILHO, J.; LIMA, P. Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate, *Mater. Struct.* 46. 2013.
- LEITE, M.B.; MONTEIRO, P.J.M. Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography. *Cement and Concrete Research*. 81. 2016.
- LEITE, Mônica Batista. Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. 2001. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, 2001.
- LIMA, Paulo Roberto Lopes; CARNEIRO, Jodilson Amorim; LEITE, Mônica Batista; FILHO, Romildo Dias Toledo. Compressive stress–strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*. Volume 46, February 2014.
- LISBÔA, E.M. Obtenção do concreto autoadensável utilizando o resíduo de serragem de mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas. 2004, 121 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2004.

- MA, J.; DIETZ, J. Ultra high performance self compacting concrete. In: Lacer, n.7, p. 33-42, 2002.
- MÄDER, U.; Schober, I.; Wombacher, F.; Ludirja, D. Polycarboxylate polymers and blends in different cements. *Cement, Concrete, and Aggregates*. v. 26, n. 2, p. 1-5, 2004.
- MATIAS, D., DE BRITO, J., ROSA, A., PEDRO, D., “Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates - Influence of the use of superplasticizers”, *Construction and Building Materials*, Vol. 44, 2013, pp. 101-109. 2013.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: IBRACON, 2014.
- MELO, K. A. de. Contribuição à dosagem de concreto autoadensável com adição de fíler calcário. 2005, 183 p. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em engenharia civil (PPGEC). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- MENDES, S. Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba. Dissertação de mestrado. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2002.
- MENEZES, C. M. T. Concreto autoadensável utilizando metacaulim e pó de pedra como adições minerais. Recife, 2006. 121 f. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco.
- MERINO, M. Del R., GRACIA, P.I., AZEVEDO, S.W. Sustainable construction: construction and demolition waste reconsidered. In: *Waste Management and Research*. Vol. 28, pg: 118-129, 2010.
- MIRANDA, L.F.R.; ANGULO, S.A.; CARELI, E.D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. In: *Revista Ambiente construído*, v.9, nº1, Porto Alegre, 2009. Disponível em <<http://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/7183/4909>>
- MIZUMOTO, C., SEGANTINI, A. A. S., SALLES, F. M., 2007 – Pavimento Intertravado com Agregados Reciclados de Concreto. In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 490 IBRACON, 2007, Rio Grande do Sul. Anais. Instituto Brasileiro do Concreto, 2007. n. 206. 2007.
- MOLIN FILHO, R. G D.. Concreto auto adensável com cinza do bagaço da cana-de-açúcar. 2012. 185 f. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia Urbana – Mestrado) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2012.
- MUÑOZ-RUIPEREZ, C.; RODRIGUEZ, A.; GUTIÉRREZ-GONZÁLEZ, S.; CALDERÓN, V. Lightweight masonry mortars made with expanded clay and recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. Volume 118, 15 August 2016.
- NASSAR, Roz-Ud-Din; SOROUSHIAN, Parviz. Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. *Construction and Building Materials*. Volume 29, April 2012.
- NEPOMUCENO, A. A. Mecanismos de transporte de fluidos no concreto, In: ISAIA, 173 G. C., Editor. In: *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo, 2005, v. 2, p. 793-827.
- NEPOMUCENO, Miguel C. S.; PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A.; LOPES, S. M. R. Methodology for the mix design of self-compacting concrete using different mineral

additions in binary blends of powders. *Construction and Building Materials*. Volume 64, 14 August 2014.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. 5 ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2016.

NIELSON, I; WALLEVIK, O. H. Rheological evaluation of some empirical test methods- Preliminary results Edição: O. Wallevik ; I, Nielson: In: *Internacional Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete*, 3rd, 2003.

NIELSSON I, WALLEVIK O. Mix Design of HS-SCC and Practical application. In: *Self-Compacting Concrete. Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium*. Eds. Wallevik O, Nielsson I, RILEM Publication, 506-513. 2003.

NUNES, S. C. B. *Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades*. 2001, 198 p. Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Estruturas de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2001. Disponível em: http://digitoool.fe.up.pt:1801/webclient/DeliveryManager?pid=6099&custom_att_2=simple_viewer. Acesso em 03 Out. 2017.

NUNES, Sandra Conceição Barbosa; OLIVEIRA, P. M.; COUTINHO, J. S.; FIGUEIRAS, J. Rheological characterization of SCC mortars and pastes with changes induced by cement delivery. *Cement and Concrete Composites*. Volume 33, Issue 1, January 2011.

OKAMURA, H. Self-compacting high performance concrete. *Concrete International*, v. 19, n. 7, p. 50-54, July 1997.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Applications of self-compacting concrete in Japan. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: *INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE*, 3rd., 2003, Reykjavik. Proceedings... France: RILEM Publications, 2003. p. 3-5.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. Development, present use and future. Edição: A. Skarendahl; O. Petersson. In: *INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE*, 1st., 1999, Stockholm. Proceedings... France: RILEM Publications, 1999. p. 3-14.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. In: *Jornal of advance concrete technology*, Vol. 1, n. 1, p 5-15, 2003. Disponível em: http://www.jstage.jst.go.jp/article/jact/1/1/5/_pdf. Acesso em: 03 Out. 2017.

OMRANE, Mohammed; et al. Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan. *Journal of Cleaner Production*. Volume 165, 1 November 2017.

PARVIZ, Soroushian. Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. *Construction and Building Materials*. Volume 29, April 2012, Pages 368-377. 2012.

PEDRO, D.; EVANGELISTA, L., DE BRITO, D. Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties. *Construction and Building Materials*. Volume 154, 15 November 2017.

PEREIRA, P., EVANGELISTA, L., DE BRITO, D. The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Constr Build Mater* , 28, 2012.

- PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L.A. NEPOMUCENO, M.C.S. CASTRO-GOMES, J.P., VILA M.F.C. Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregates. *Constr. Build. Mater.*, 51, 2014.
- POON, C.S. SHUI, Z.H. LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates, *Constr. Build. Mater.* 18 (6), 2004.
- POON, C.S.; SHUI, Z.H.; LAM, L.; FOK, H.; KOU, S.C. Influence of moisture state of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete, *Cem. Concr. Res.* 34 (1), 2004.
- QUATTRONE, M.; CAZACLIU, B.; ANGULO, S.C. et al. Measuring the water absorption of recycled aggregates, what is the best practice for concrete production. *Constr. Build. Mater.*, 123 (123) 2016.
- RAJHANS, Puja; PANDA, Sarat Kumar; NAYAK, Sanket. Sustainable self compacting concrete from C&D waste by improving the microstructures of concrete ITZ. *Construction and Building Materials*. Volume 163, 28 February 2018.
- SAFIUDDIN, M.; SALAM, M. A.; JUMAAT, M. Z. Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete. *Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 4, 2011, pp. 1023–1041. 2011.
- SAFIUDDIN, M.D. SALAM, M.A. JUMAAT, M.Z. Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete. *Arch. Civ. Mech. Eng.*, 11, 2011.
- SALESA, Angel; et al. Physico – mechanical properties of multi – recycled concrete from precast concrete industry. *Journal of Cleaner Production*. Volume 141, 10 January 2017, Pages 248-255. 2017.
- SALESA, Angela; et al. Physico-mechanical properties of multi-recycled self-compacting concrete prepared with precast concrete rejects. *Construction and Building Materials*. Volume 153, 30 October 2017.
- SANTOS, G. S. C. D.; et al. Performance of recycled concretes exposed to sulphate soil for 10 years. *Construction and Building Materials*. Volume 102, Part 1, 15 January 2016.
- SEÑAS, L.; PRIANO, C.; MARFIL, S. Influence of recycled aggregates on properties of self consolidating concretes. *Construction and Building Materials*, v. 113, p. 498-505, 2016.
- SHEINN, D.; HO, D. W. S.; TAM, C. T. Effect of particle shape on paste rheology of SCC. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: *INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELFCOMPACTING CONCRETE*, 3rd., 2003, Reykjavik. Proceedings... France: RILEM Publications, 2003. p. 232-239.
- SILVA, P.; BRITO, J. Betão autocompactável- estado atual do conhecimento, Instituto Superior Técnico, p. 16-20. 2009.
- SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K.. Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review. *Construction and Building Materials*, Volume 178, 30 July 2018, Pages 19-31. 2018.
- SILVA, R.V.; DE BRITO, J; DHIR, R.K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production, *Constr. Build. Mater.* 65. 2014.

- SILVA, W. R. L.; STEMBERK, P. Expert system applied for classifying self-compacting concrete surface finish. *Advances in Engineering Software*, v. 64, p. 47-61, 2013.
- SIMONI, J.H.; ALENCAR, J. L. S. DE; FIORELLI, M. N.; NETO, G. A. Gerenciamento de resíduos da construção civil: estudo de caso em usina de reciclagem em Maringá – PR. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria. Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM. e-ISSN 2236 1170 - V. 19, n. 2, mai-ago. 2015, p. 568-574.*
- SINGH, S. K. Use of recycled aggregate in concrete - Paradigm Shift. Out.2007. Disponível em: <<http://www.nbmcw.com/articles/concrete/576-use-of-recycled-aggregatesin-concrete-a-paradigm-shift.html>>
- SKARENDAHL, A. The present – the future. Edição: O. Wallevik and I. Nielsson. In: *INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE*, 3st, 2003, Reykjavik. Proceedings... France: RILEM Publications, 2003, p.6-14.
- SKARENDAHL, A. The present – the future. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: *INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE*, 3rd. 2003, Reykjavik. Proceedings... France: RILEM Publications, 2003. p. 6-14. 2003.
- SUGAMATA, T.; EDAMATSU, Y.; OUCHI, M. A study of particle dispersing retention effect of polycarboxylate-based superplasticizers. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: *INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE*, 3rd., 2003, Reykjavik. Proceedings... France: RILEM Publications, 2003. p. 420-431.
- SUGAMOSTO, R. Comparativo entre concretos produzidos com sílica ativa em pó e sílica ativa em forma de lama. Curitiba, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2007.
- TAM, V.W.Y. GAO, X.F. TAM, C.M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, *Cem. Concr. Res.* 35 (6), 2005.
- TANG, P.; FLOREA, M.V.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H.J.H. Application of thermally activated municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash fines as binder substitute *Cem. Concr. Compos.*, 70. 2016.
- TAVEIRA, Alberto Fábio Da Silva. Avaliação da Utilização do Agregado de Concreto Reciclado (ACR) em Substituição ao Agregado Miúdo na Fabricação de Argamassas e Peças de Concreto para Pavimentação. Universidade Federal Do Amazonas. Manaus. 2010.
- TESSARO, Alessandra Buss; SA, Jocelito Saccol de and SCREMIN, Lucas Bastianello. Quantificação e classificação dos resíduos procedentes da construção civil e demolição no município de Pelotas, RS. *Ambient. constr.* [online]. 2012, vol.12, n.2, pp.121-130. ISSN 1678-8621. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212012000200008>.
- THOMAS, B. S., et al. Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance. *Journal of Cleaner Production*. Volume 112, Part 1, 20 January 2016.
- THOMAS, C.; SETIÉN, J.; POLANCO, J. A.; CIMENTADA, A. I.; MEDINA, C. Influence of curing conditions on recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 172, 30 May 2018, Pages 618-625.
- TORALLES-CARBONARI, M.B.; ELIAN, M.M.S.; CARBONARI, G. Influência da compacidade do esqueleto granular no consumo de pasta e nas propriedades do CAD. In: *V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto*, p.1-12, 2003.

- TORALLES-CARBONARI, M.B.; GETTU, R.; AGULLÓ, L.; AGUADO, A.; ACENÁ, V. A synthetic approach for experimental optimization of high strength concrete, In: 4th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH STRENGTH/HIGH PERFORMANCE CONCRETE, Paris, 1996. p.161-167.
- TUTIKIAN, B. F. Método para dosagem de concreto autoadensável. 2004, 149 p. Dissertação de mestrado. Pós-graduação em engenharia civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- TUTIKIAN, B. F. Proposição de um método de dosagem experimental para concretos autoadensáveis. 2007. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- TUTIKIAN, B. F., DAL MOLIN, D.. Comparativo das propriedades do concreto autoadensável (CAA) utilizando areia fina e cinza volante. Rev. IBRACON Estrut. Mater. [online]. 2011, vol.4, n.2, pp.247-276. ISSN 1983-4195. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952011000200006>.
- TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D.C. Concreto auto-adensável. São Paulo: Pini, 2008.
- TUYAN, M.; MARDANI-AGHABAGLOU, A.; RAMYAR, K. Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. Materials & Design. Volume 53, January 2014.
- UL ISLAM, M. M.; et al. Mechanical and fresh properties of sustainable oil palm shell lightweight concrete incorporating palm oil fuel ash. Journal of Cleaner Production. Volume 115, 1 March 2016.
- WALRAVEN, J. Structural aspects of self-compacting concrete. Edição: O.Wallevick; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SIMPOSIUM ON SELFCOMPACTING CONCRETE, 3rd., 2003, Reykjavik. Proceedings...France: RILEM Publications, p.15-22, 2003.
- ZEGA, C.; DI MAIO, A. Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. Waste Manage., 31 (11), 2011.
- ZEGA, C.; VILLAGRÁN-ZACCARDI, Y.; DI MAIO, A. Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates Mater. Struct., 43 (1–2), 2010.